

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA
INSTITUTO INTERUNIVERSITARIO DE INVESTIGACIÓN DEL SISTEMA TIERRA EN
ANDALUCÍA
GRUPO DE DINÁMICA FLUVIAL E HIDROLOGÍA

Programa de Doctorado
Dinámica de los flujos biogeoquímicos y sus aplicaciones

Tesis Doctoral

ANÁLISIS DE TENDENCIAS EN LOS FLUJOS DE AGUA Y ENERGÍA DE LA CAPA DE NIEVE A DIVERSAS ESCALAS EN SIERRA NEVADA

(Trend analysis of water and energy fluxes in snowpacks on different scales in Sierra Nevada)



Doctorando: María José Pérez Palazón

Directores: María José Polo Gómez

Rafael Pimentel Leiva

Córdoba, 25 de octubre de 2019

TITULO: *ANÁLISIS DE TENDENCIAS EN LOS FLUJOS DE AGUA Y ENERGÍA
DE LA CAPA DE NIEVE A DIVERSAS ESCALAS EN SIERRA
NEVADA*

AUTOR: *Maria José Pérez Palazón*

© Edita: UCOPress. 2019
Campus de Rabanales
Ctra. Nacional IV, Km. 396 A
14071 Córdoba

<https://www.uco.es/ucopress/index.php/es/>
ucopress@uco.es



TÍTULO DE LA TESIS: Análisis de tendencias en los flujos de agua y energía de la capa de nieve a diversas escalas en Sierra Nevada

DOCTORANDO/A: María José Pérez Palazón

INFORME RAZONADO DEL/DE LOS DIRECTOR/ES DE LA TESIS

(se hará mención a la evolución y desarrollo de la tesis, así como a trabajos y publicaciones derivados de la misma).

María José Polo Gómez y Rafael Pimentel Leiva, catedrática de Ingeniería Hidráulica del Departamento de Agronomía de la Universidad de Córdoba y Contratado Postdoctoral Submodalidad 5.2 del Plan Propio 2018 de la Universidad de Córdoba, como directores de la tesis doctoral de la alumna del Programa de Doctorado “Dinámica de Flujos Biogeoquímicos y sus Aplicaciones” María José Pérez Palazón

INFORMAN

Que la doctoranda ha cubierto los objetivos propuestos en la tesis, analizado las tendencias en los flujos de agua y energía en la capa de nieve en el área de Sierra Nevada. De manera que, tras la tesis y como conclusión de ésta, se dispone de un completo análisis tanto para el periodo histórico (1960-2016) como para el periodo futuro (2006-2100) a diversas escalas espaciotemporales de la evolución de los flujos condicionantes de la dinámica de la nieve en Sierra Nevada (España). Para ello se ha recopilado un gran volumen de información meteorológica histórica disponible (precipitación y temperatura) en el área de estudio, de la cual se han derivado la ocurrencia del régimen níveo. Se ha hecho hincapié en el estudio del carácter árido y torrencial, no sólo del régimen de precipitación sino también del níveo, definiendo nuevos índices para caracterizarlo. Además, dichos índices han permitido zonificar el área de estudio en función de dichas condiciones. Se ha utilizado también modelado de base física para estudiar los flujos de masa y energía en la capa de nieve, estudiando su importancia relativa y su interrelación con las condiciones de torrencialidad y aridez encontradas. Finalmente, el mismo análisis se ha realizado para el futuro, utilizando para ello dos escenarios de emisiones futuras resultado de la combinación de modelado circulatorio a escala global y técnicas de *downscaling*.

El trabajo, uno de sus capítulos, se ha plasmado íntegramente en una publicación en revista indexada en el JCR (Q2), además de formar parte del trabajo recogido en otras dos publicaciones indexadas (Q1), tres aportaciones a congresos indexados por revisión por pares, así como en los informes finales de los proyectos *Estudio del efecto del cambio global sobre la*

nieve y la hidrología de alta montaña en el Parque Nacional de Sierra Nevada, Influencia del cambio global en los servicios ecosistémicos asociados a la hidrología en el Parque Nacional de Sierra Nevada y Índices de torrencialidad y aridez relacionados con la nieve en el Parque Nacional de Sierra Nevada y sus zonas limítrofes en un contexto de cambio global: Implicaciones para la gestión de recursos hídricos de las convocatorias competitivas ayudas 2013, 2014 y 2015 de la Fundación Biodiversidad, lo que avala la calidad del trabajo realizado.

Por todo ello, se autoriza la presentación de la tesis doctoral

Córdoba, 25 de octubre de 2019

Firma del/de los director/es



Fdo.: María José Polo Gómez



Fdo.: Rafael Pimentel Leiva

Agradecimientos

A los proyectos *Estudio del efecto del cambio global sobre la nieve y la hidrología de alta montaña en el Parque Nacional de Sierra Nevada*, *Influencia del cambio global en los servicios ecosistémicos asociados a la hidrología en el Parque Nacional de Sierra Nevada* y *Índices de torrencialidad y aridez relacionados con la nieve en el Parque Nacional de Sierra Nevada y sus zonas limítrofes en un contexto de cambio global: Implicaciones para la gestión de recursos hídricos*, financiados en las convocatorias competitivas de ayudas 2013, 2014 y 2015 de la Fundación Biodiversidad, Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente

Al proyecto CGL2014-58508R, *Sistema de seguimiento global de la cubierta de nieve en regiones mediterráneas: análisis de tendencias e implicaciones para la disponibilidad de recursos hídricos en Sierra Nevada – GMS-SNOWMED*, financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad.

A la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) y a la Red de Información Ambiental de Andalucía (REDIAM) que han facilitado información necesaria para poder llevar a cabo este estudio.

A los gestores del Espacio Natural Protegido de Sierra Nevada por todas las facilidades dadas para llevar a cabo las labores investigadoras dentro de sus límites.

ÍNDICE

Agradecimientos	vii
ÍNDICE	i
Lista de Figuras	v
Lista de Tablas	xiii
Resumen	17
INTRODUCCIÓN	19
Zona de estudio	4
Recursos disponibles para el estudio	6
Información climática: series de datos históricos	6
Información climática: proyecciones de clima futuro bajo escenarios de emisiones	9
Modelado distribuido de la dinámica de la nieve en Sierra Nevada	10
<i>Interpolación de las variables meteorológicas</i>	11
<i>Precipitación en forma de nieve</i>	11
<i>Modelado de la dinámica de la capa nieve</i>	11
Objetivos y estructura de la tesis	13
Objetivos	13
Estructura de la tesis	13
BLOQUE I : Análisis de tendencias del régimen de precipitación en forma de nieve en Sierra Nevada	15
CAPÍTULO 1: Análisis del régimen de precipitación en forma de nieve en el área de Sierra Nevada a distintas escalas espaciotemporales	19
1.1 Introducción	19
1.2 Metodología	20
1.2.1 Interpolación espacial de la información meteorológica	20
1.2.2 Ocurrencia de precipitación en forma de nieve	20
1.2.3 Análisis de datos a largo plazo: estadísticas y tendencias	21
1.3 Resultados	21
1.3.1 Análisis de tendencias del régimen de precipitación	21
1.3.1.1 Análisis puntual	21
1.3.1.2 Análisis distribuido	29
1.3.2 Análisis de tendencias del régimen de temperaturas	34
1.3.2.1 Análisis puntual	34
1.3.2.2 Análisis distribuido	41
1.3.3 Análisis de tendencias del régimen de precipitación en forma de nieve.	47
1.3.3.1 Análisis Puntual	47
1.3.3.2 Análisis distribuido	49
1.4 Discusión	54
1.5 . Conclusiones	59

CAPÍTULO 2: Índices de torrencialidad y aridez relacionados con el régimen de la nieve en Sierra Nevada	63
2.1 Introducción	63
2.2 Metodología	63
2.3 Resultados	66
2.3.1 Obtenidos con la precipitación	66
2.3.1.1 Escala media	66
2.3.1.2 Escala de evento	75
2.3.2 Obtenidos con la precipitación en forma de nieve	77
2.3.2.1 Escala media	77
2.3.2.2 Escala evento	86
2.4 Discusión	86
2.5 Conclusiones	90
Conclusiones Bloque I	93
<i>BLOQUE II : Impacto de las tendencias climáticas observadas: influencia en el régimen de los flujos de la nieves y evaluación de escenarios futuros en Sierra Nevada</i>	95
CAPÍTULO 3: Impactos del régimen climático sobre la dinámica de la capa de nieve en Sierra Nevada	99
3.1 Introducción	99
3.2 Metodología	99
3.3 Resultados	100
3.3.1 Flujos de masa: Fusión y evaposublimación	100
3.3.2 Volumen: Equivalente de agua	105
3.3.3 Persistencia	107
3.4 Discusión	111
3.5 Conclusiones	116
CAPÍTULO 4: Evaluación de escenarios climáticos futuros en la dinámica de la nieve en Sierra Nevada	117
4.1 Introducción	117
4.2 Metodología	117
4.2.1 Selección de datos de escenarios futuros	117
4.2.2 Análisis de variables descriptoras en el periodo futuro	118
4.3 Resultados	120
4.3.1 Análisis de regímenes meteorológicos	120
4.3.2 Análisis de torrencialidad y aridez	128
4.3.2.1 Obtenidos con la precipitación	128
4.3.2.2 Obtenidos con la precipitación en forma de nieve	132
4.3.3 Análisis de los flujos de nieve	135
4.3.3.1 Flujos de masa en la capa de nieve	135
4.3.3.2 Equivalente de agua	140
4.3.3.3 Días con nieve en superficie y Superficie cubierta de nieve.	143
4.4 Discusión	147
4.5 Conclusiones	152
Conclusiones Bloque II	155

ANEJOS	157
<i>Appendix A: Test estadístico Mann-Kendall</i>	159
<i>Appendix B: Zonificación dentro del área del Parque Nacional y Natural de Sierra Nevada</i>	161
<i>Appendix C: Análisis a escala anual por meses en el área del Parque Nacional y Natural de Sierra Nevada</i>	177
BIBLIOGRAFÍA	189

Lista de Figuras

Figura i Distribución global de zonas de montañas y áreas de clima mediterráneo en el mundo.....	3
Figura ii Localización del área de Sierra Nevada en España junto con el modelo digital de elevaciones del área de estudio y sus regiones en el mismo. Límites de las zonas protegidas: Parque Nacional (línea ocre) y Parque Natural (línea burdeos); límites de las cinco regiones en las que el área de estudio ha sido dividida (línea negra): R1 - Adra, R2 - Andarax, R3 -Fardes, R4 - Genil y R5 - Guadalfeo.	6
Figura iii. Localización de todas las estaciones meteorológicas disponibles en la zona de estudio (puntos grises), 44 estaciones de precipitación (aspa (X) roja) y 28 estaciones de temperatura (cruz (+) roja) seleccionadas, de las cuales 11 estaciones proporcionan ambas (asterisco (*) rojo). Límites de las cinco regiones en las que el área de estudio ha sido dividida (línea negra): R1 - Adra, R2 - Andarax, R3 -Fardes, R4 - Genil y R5 - Guadalfeo.....	7
Figura iv Disponibilidad de datos meteorológicos: a) Diagrama de Gantt para las estaciones de precipitación seleccionadas; b) Perfil altitudinal de la ubicación de las estaciones de precipitación seleccionadas; c) Diagrama de Gantt para las estaciones de temperatura seleccionadas; b) Perfil altitudinal de la ubicación de las estaciones de temperatura seleccionadas.	9
Figura v Representación esquemática de los contenidos y la estructura del trabajo de tesis doctoral.	13
Figura 1.1 Precipitación anual por décadas en las estaciones meteorológicas ubicadas en las diferentes regiones (R1: rojo; R2: naranja; R3: verde oliva; R4: turquesa; R5: azul). Evolución obtenida en cada una de las estaciones: triángulo rojo: evolución decreciente; triángulo azul: evolución creciente. (Triángulo relleno, tendencia estadística con significancia $\alpha = 0.1$).	22
Figura 1.2 Días de precipitación al año por décadas en las estaciones meteorológicas ubicadas en las diferentes regiones (R1: rojo; R2: naranja; R3: verde oliva; R4: turquesa; R5: azul). Evolución obtenida en cada una de las estaciones: triángulo rojo: evolución decreciente; triángulo azul: evolución creciente. (Triángulo relleno, tendencia estadística con significancia $\alpha = 0.1$).	23
Figura 1.3 Distribución de la precipitación anual (a) y los días de precipitación al año (b) en las estaciones analizadas en las diferentes regiones (R1: rojo; R2: naranja; R3: verde oliva; R4: turquesa; R5: azul). Mapa de evolución de las estaciones meteorológicas con datos de precipitación anual (c) y la variable derivada Dpre (d): Triángulo rojo: evolución decreciente; Triángulo azul: evolución creciente. En ambos casos, la intensidad del color refleja las estaciones con tendencia significativa con un nivel de confianza $\alpha = 0,1$	26
Figura 1.4 Distribución de la precipitación mensual para en las estaciones meteorológicas con datos de precipitación en las diferentes regiones (R1: rojo; R2: naranja; R3: verde oliva; R4: turquesa; R5: azul). Evolución obtenida en cada una de las estaciones: triángulo rojo: evolución negativa; triángulo azul: evolución positiva. (Triángulo relleno, tendencia estadística con significancia $\alpha = 0.1$).	27
Figura 1.5 Distribución mensual de los días con precipitación para en las estaciones meteorológicas con datos de precipitación en las diferentes regiones (R1: rojo; R2: naranja; R3: verde oliva; R4: turquesa; R5: azul). Evolución obtenida en cada una de las estaciones: triángulo rojo: evolución negativa; triángulo azul: evolución positiva. (Triángulo relleno, tendencia estadística con significancia $\alpha = 0.1$).	28
Figura 1.6 Valores distribuidos y promediados de las variables del régimen de precipitación analizadas a escala decenal en el periodo analizado comprendido entre 1961-2015.	30
Figura 1.7 (a) Evolución de precipitación anual en el periodo 1961-2015 promediada en el área de estudio: línea discontinua: tendencia de la evolución; línea continua: valor medio del periodo de estudio; área sombreada: desviación típica de la variable. (b) mapa distribuido del valor medio de precipitación anual (c) tendencias distribuidas en el área de estudio para la precipitación anual (d) mapa de la desviación típica distribuida para la precipitación en el periodo de estudio 1961-2015.....	31

Figura 1.8 (a) Evolución del número de días con precipitación anual en el periodo 1961-2015 promediada en el área de estudio: línea discontinua: tendencia de la evolución; línea continua: valor medio del periodo de estudio; área sombreada: desviación típica de la variable. (b) mapa distribuido del valor medio de precipitación anual (c) tendencias distribuidas en el área de estudio para la precipitación anual (d) mapa de la desviación típica distribuida para la precipitación en el periodo de estudio 1961-2015	32
Figura 1.9 Diagrama de cajas sobre la evolución del régimen de precipitación mensual: a) P, precipitación mensual; b) Dpre, número de días al mes con precipitación. Tendencia encontrada en cada uno de los meses del año: triángulo rojo: evolución decreciente; triángulo azul: evolución creciente. En ambos casos, el triángulo relleno refleja las estaciones con tendencia estadísticamente significativa con nivel de confianza del 90%.	34
Figura 1.10 Evolución de la temperatura diaria media anual por décadas en las estaciones meteorológicas ubicadas en las diferentes regiones (R1: rojo; R2: naranja; R3: verde oliva; R4: turquesa; R5: azul). Tendencia encontrada en cada una de las estaciones: triángulo rojo: tendencia positiva; triángulo azul: tendencia negativa. (Triángulo relleno, significancia estadística igual o superior al 90% de confianza)...35	35
Figura 1.11 Evolución de la variable Días al año con temperatura mínima inferior a 0 °C por décadas en las estaciones meteorológicas ubicadas en las diferentes regiones (R1: rojo; R2: naranja; R3: verde oliva; R4: turquesa; R5: azul). Tendencia encontrada en cada una de las estaciones: triángulo rojo: tendencia positiva; triángulo azul: tendencia negativa. (Triángulo relleno, significancia estadística igual o superior al 90% de confianza).	36
Figura 1.12 Evolución de temperatura media diaria anual (a) y los días con temperatura mínima inferior a 0 °C al año (b) en las estaciones analizadas en las diferentes regiones (R1: rojo; R2: naranja; R3: verde oliva; R4: turquesa; R5: azul). Mapa de localización de las estaciones meteorológicas con datos de temperatura con la tendencia encontrada en la variable temperatura media (c) y la variable derivada DTmin (d): Triángulo rojo: tendencia creciente; Triángulo azul: tendencia decreciente. En ambos casos, la intensidad del color refleja las estaciones con tendencia estadísticamente significativa con nivel de confianza superior al 90%.	38
Figura 1.13 Diagrama de cajas sobre la evolución de la temperatura media diaria mensual para cada una de las estaciones analizadas en las diferentes regiones (R1: rojo; R2: naranja; R3: verde oliva; R4: turquesa; R5: azul). Tendencia encontrada en la variable en cada uno de los meses del año: Triángulo rojo: tendencia creciente; Triángulo azul: tendencia decreciente. En ambos casos, la intensidad del color refleja las estaciones con tendencia estadísticamente significativa con nivel de confianza superior al 90%.	40
Figura 1.14 Diagrama de cajas sobre la evolución del número de días al mes con temperaturas inferiores a 0 °C para cada una de las estaciones analizadas en las diferentes regiones (R1: rojo; R2: naranja; R3: verde oliva; R4: turquesa; R5: azul). Tendencia encontrada en la variable en cada uno de los meses del año: Triángulo rojo: tendencia creciente; Triángulo azul: tendencia decreciente. En ambos casos, la intensidad del color refleja las estaciones con tendencia estadísticamente significativa con nivel de confianza superior al 90%.	41
Figura 1.15 Valores distribuidos y promediados de las variables del régimen de temperaturas analizadas a escala decenal en el periodo analizado comprendido entre 1961-2015.	42
Figura 1.16 (a) Evolución de la temperatura media anual de las máxima, media y mínima diaria en el periodo 1961-2015 promediada en el área de estudio: línea discontinua: tendencia de la evolución; línea continua: valor medio del periodo de estudio; área sombreada: desviación típica de la variable. (b) mapa distribuido del valor medio Tmax. (c) tendencias distribuidas en el área de estudio para la Tmax (d) mapa de la desviación típica distribuida para la Tmax en el periodo de estudio 1961-2015. (e) mapa distribuido del valor medio de Tmed. (f) tendencias distribuidas en el área de estudio para la Tmed. (g) mapa de la desviación típica distribuida para la Tmed en el periodo de estudio 1961-2015. (h) mapa distribuido del valor medio de Tmin. (i) tendencias distribuidas en el área de estudio para la Tmin. (j) mapa de la desviación típica distribuida para Tmin en el periodo de estudio 1961-2015.....	44

Figura 1.17 (a) Evolución del número de días con temperaturas inferiores o iguales a 0 °C anual en el periodo 1961-2015 promediada en el área de estudio: línea discontinua: tendencia de la evolución; línea continua: valor medio del periodo de estudio; área sombreada: desviación típica de la variable. (b) mapa distribuido del valor medio de DTmin (c) tendencias distribuidas en el área de estudio para DTmin (d) mapa de la desviación típica distribuida para DTmin en el periodo de estudio 1961-2015	45
Figura 1.18 Diagrama de cajas sobre la evolución del régimen de temperaturas mensual: a) Temperatura máxima; b) Temperatura media; c) Temperatura mínima; d) Días al mes con temperatura mínima inferior o igual a 0 °C. Tendencia encontrada en cada uno de los meses del año: Triángulo rojo: tendencia creciente; Triángulo azul: tendencia decreciente. Para todos los casos, la intensidad del color refleja las estaciones tendencia estadísticamente significativa con nivel de confianza superior al 90%	47
Figura 1.19 Evolución de la precipitación en forma de nieve acumulada anual (a) y el número de días con precipitación en forma de nieve anual (b) obtenidos por el método de TSN para las temperaturas máximas (Mx), medias (Md) y mínimas (Mn) observadas en cada una de las estaciones analizadas en las diferentes regiones (R1: rojo; R2: naranja; R3: verde oliva; R4: turquesa; R5: azul).	48
Figura 1.20 Valores distribuidos y promediados de las variables del régimen de precipitación en forma de nieve a escala de década en el periodo analizado comprendido entre 1961-2015.	50
Figura 1.21 (a) Evolución de precipitación en forma de nieve anual en el periodo 1961-2015 promediada en el área de estudio: línea discontinua: tendencia de la evolución; línea continua: valor medio del periodo de estudio; área sombreada: desviación típica de la variable. (b) mapa distribuido del valor medio de Pn (c) tendencias distribuidas en el área de estudio para Pn (d) mapa de la desviación típica distribuida para la Pn en el periodo de estudio 1961-2015.....	51
Figura 1.22 (a) Evolución del número de días con precipitación en forma de nieve anual en el periodo 1961-2015 promediada en el área de estudio: línea discontinua: tendencia de la evolución; línea continua: valor medio del periodo de estudio; área sombreada: desviación típica de la variable. (b) mapa distribuido del valor medio de Dpn (c) tendencias distribuidas en el área de estudio para la Dpn (d) mapa de la desviación típica distribuida para la Dpn en el periodo de estudio 1961-2015	52
Figura 1.23 Diagrama de cajas sobre la evolución del régimen de precipitación de nieve mensual: a) Precipitación de nieve acumulada mensual; b) Dpn mensual. Tendencia encontrada en cada uno de los meses del año: Triángulo rojo: tendencia decreciente; Triángulo azul: tendencia creciente. En ambos casos, la intensidad del color refleja los meses con tendencia estadísticamente significativa con nivel de confianza superior al 90%.	54
Figura 1.24 Ocurrencia de tendencias a escala de década, año y meses observadas para las variables analizadas en las estaciones disponibles en cada región delimitada en este estudio (R1 a R5): a) Precipitación mensual; b) Días al mes con precipitación; c) Temperatura media diaria mensual; d) Días al mes con temperatura mínima diaria inferior a 0 °C. Verde: tendencia creciente; Salmón: tendencia decreciente. La intensidad del color se asocia a tendencias estadísticamente significativas con nivel de confianza superior al 90%.	56
Figura 1.25 Distribución regional en Sierra Nevada de los valores medios anuales de las variables analizadas junto con sus tendencias (las líneas oblicuas indican significancia con nivel de confianza igual, o superior más rayado, al 90%) durante el periodo de referencia (1961-2015).....	57
Figura 2.1 Evolución del índice Dsp para el periodo 1961-2015 en las regiones R2 y R5. b) Diagrama de cajas de las estaciones de la R5. c) Diagrama de cajas de las estaciones de la R2 (representadas en orden creciente de cota). Tendencia encontrada en cada uno de las estaciones a escala anual: Triángulo vértice hacia arriba (rojo): tendencia creciente; Triángulo vértice hacia abajo (azul): tendencia decreciente. En ambos casos, la intensidad del color refleja las estaciones con tendencia estadísticamente significativa superior al 90% de ocnfianza.	66
Figura 2.2 Evolución DSp: a) evolución anual; b) Evolución anual por décadas: R1, rojo; R2, naranja; R3, verde; R4, turquesa; R5, azul; Total, negro. Tendencia encontrada en cada una de las estaciones a escala anual: Triángulo vértice hacia arriba (rojo): tendencia creciente; Triángulo vértice hacia abajo (azul):	

tendencia decreciente. En ambos casos, la intensidad del color refleja las estaciones con tendencia estadísticamente significativa superior al 90% de confianza.....	67
Figura 2.3 Evolución IAp: a) evolución anual; b) Evolución anual por décadas: R1, rojo; R2, naranja; R3, verde; R4, turquesa; R5, azul; Total, negro. Tendencia encontrada en cada una de las estaciones a escala anual: Triángulo vértice hacia abajo (rojo): tendencia decreciente; Triángulo vértice arriba (azul): tendencia creciente. En ambos casos, la intensidad del color refleja las estaciones con tendencia estadísticamente significativa superior al 90%.....	68
Figura 2.4 Distribución espacial del valor medio del índice de aridez, IAp, a escala de década (D1, 1961-1970; D2, 1971-1980; D3, 1981-1990; D4, 1991-2000; D5, 2001-2010; D6 incompleta, 2011-2015; años hidrológicos) para el periodo 1961-2015 (0-40, estepario; 40-60, semiárido; 60-100, templado cálido; 100-160, templado húmedo; >160, húmedo).....	70
Figura 2.5 Evolución anual del ITp en Sierra Nevada en los umbrales: 10,50,75,90,95 y 99, durante el periodo 1961-2015 toda el área analizada.	72
Figura 2.6 Distribución de los valores anuales del índice Ip para el periodo 1961-2015 en las regiones R2 y R5.a) Diagrama de cajas de las estaciones de la R2 b) Diagrama de cajas de las estaciones de la R5 (representadas en orden creciente de cota). Tendencia encontrada en cada uno de las estaciones a escala anual: Triángulo vértice hacia arriba (rojo): tendencia creciente; Triángulo vértice hacia abajo (azul): tendencia decreciente. En ambos casos, la intensidad del color refleja las estaciones con tendencia estadísticamente significativa con nivel de confianza superior al 90%.	72
Figura 2.7 Evolución Ip: a) evolución anual; b) Evolución anual por décadas: R1, rojo; R2, naranja; R3, verde; R4, turquesa; R5, azul; Total, negro. Tendencia encontrada en cada uno de las estaciones a escala anual: Triángulo vértice hacia abajo (rojo): tendencia decreciente; Triángulo vértice arriba (azul): tendencia creciente. En ambos casos, la intensidad del color refleja las estaciones con tendencia estadísticamente significativa superior al 90%.....	73
Figura 2.8 Distribución espacial del valor medio del índice de aridez, IAp, a escala de década (D1, 1961-1970; D2, 1971-1980; D3, 1981-1990; D4, 1991-2000; D5, 2001-2010; D6 incompleta, 2011-2015; años hidrológicos) para el periodo 1961-2015.....	74
Figura 2.9 Evolución del índice ISp para el periodo 1961-2015 en las regiones R2 y R5. a) Diagrama de cajas de las estaciones de la R2 b) D Diagrama de cajas de las estaciones de la R5 (representadas en orden creciente).Tendencia encontrada en cada uno de las estaciones a escala anual: Triángulo vértice hacia arriba (rojo): tendencia creciente; Triángulo vértice hacia abajo (azul): tendencia decreciente. En ambos casos, la intensidad del color refleja las estaciones con tendencia estadísticamente significativa superior al 90%.....	75
Figura 2.10 Evolución del índice ISp para el periodo 1961-2015 en las regiones R2 y R5. a) Diagrama de cajas de las estaciones de la R2 b) D Diagrama de cajas de las estaciones de la R5 (representadas en orden creciente). Tendencia encontrada en cada uno de las estaciones a escala anual: Triángulo vértice hacia arriba (rojo): tendencia creciente; Triángulo vértice hacia abajo (azul): tendencia decreciente. En ambos casos, la intensidad del color refleja las estaciones con tendencia estadísticamente significativa con nivel de confianza superior al 90%.....	76
Figura 2.11 Evolución anual de los eventos extremos: a) índices ISp (marrón) y índice IHp (azul) b) la intensidad asociada al evento c) Tmedia asociada al evento durante el periodo 1961-2015 para todo el área de estudio.....	77
Figura 2.12 Evolución DS _n : a) evolución anual; b) Evolución anual por décadas: R1, rojo; R2, naranja; R3, verde; R4, turquesa; R5, azul; Total, negro. Tendencia encontrada en cada uno de las estaciones a escala anual: Triángulo vértice hacia arriba (rojo): tendencia creciente; Triángulo vértice hacia abajo (azul): tendencia decreciente. En ambos casos, la intensidad del color refleja las estaciones con tendencia estadísticamente significativa superior al 90%.....	78

Figura 2.13 Evolución IAn a) evolución anual; b) Evolución anual por décadas: R1, rojo; R2, naranja; R3, verde; R4, turquesa; R5, azul; Total, negro. Tendencia encontrada en cada uno de las estaciones a escala anual: Triángulo vértice hacia abajo (rojo): tendencia decreciente; Triángulo vértice arriba (azul): tendencia creciente. En ambos casos, la intensidad del color refleja las estaciones con tendencia estadísticamente significativa superior al 90%.....	79
Figura 2.14 Distribución espacial del valor medio del índice de aridez, IAn, a escala de década (D1, 1961-1970; D2, 1971-1980; D3, 1981-1990; D4, 1991-2000; D5, 2001-2010; D6 incompleta, 2011-2015; años hidrológicos) para el periodo 1961-2015.....	80
Figura 2.15 Evolución anual del ITn en el área de estudio para los umbrales: 10,50,75,90,95 y 99.....	82
Figura 2.16 Evolución In: a) evolución anual; b) Evolución anual por décadas: R1, rojo; R2, naranja; R3, verde; R4, turquesa; R5, azul; Total, negro. Tendencia encontrada en cada uno de las estaciones a escala anual: Triángulo vértice hacia abajo (rojo): tendencia decreciente; Triángulo vértice arriba (azul): tendencia creciente. En ambos casos, la intensidad del color refleja las estaciones con tendencia estadísticamente significativa superior al 90%.....	83
Figura 2.17 Distribución espacial del valor medio del índice de aridez, IAp, a escala de década (D1, 1961-1970; D2, 1971-1980; D3, 1981-1990; D4, 1991-2000; D5, 2001-2010; D6 incompleta, 2011-2015; años hidrológicos) para el periodo 1961-2015.....	85
Figura 2.18 Evolución anual de los eventos extremos: a) índices ISn (marrón) y índice IHn (azul) b) la intensidad asociada al evento c) Tmedia asociada al evento durante el periodo 1961-2015 para todo el área de estudio.....	86
Figura 2.19 Distribución regional en Sierra Nevada de los valores medios en las variables analizadas junto con los valores de las décadas medias durante el periodo analizado 1961-2015.....	88
Figura 2.20 Condiciones de aridez (IA*) vs condiciones de torrencialidad (I*), para el régimen (a) precipitación (IAp* y Ip*) y (b) precipitación en forma de nieve (IAN* y In*) a escala anual en todo el área de estudio.....	89
Figura 2.21 Condiciones de aridez (IA*) vs condiciones de torrencialidad (I*), para el régimen precipitación (IAp* y Ip*) (fila superior) precipitación en forma de nieve (IAN* y In*) (fila inferior) por regiones para todo el periodo (columna izquierda) y por décadas para cada región y para toda el área (aspas negras).	90
Figura 3.1 Valores distribuidos y promediados de las variables indicadoras del régimen de la nieve: Fusión y evaposublimación a escala decenal en el periodo analizado comprendido entre 1961-2015.....	101
Figura 3.2 (a) Evolución de los flujos de nieve fusión (azul) y evaposublimación (violeta) anual en el periodo 1961-2015 promediada en el área de estudio: línea discontinua: evolución; línea continua: valor medio del periodo de estudio; área sombreada: desviación típica de la variable. (b) mapa distribuido del valor medio de fusión anual. (c) tendencias distribuidas en el área de estudio para la fusión (d) mapa de la desviación típica distribuida para la fusión de nieve en el periodo de estudio 1961-2015. (e) mapa distribuido del valor medio de la evaposublimación anual. (f) tendencias distribuidas en el área de estudio para la evaposublimación. (g) mapa de la desviación típica distribuida para la evaposublimación en el periodo de estudio 1961-2015.	103
Figura 3.3 Evolución de la variable F* flujos de nieve fusión (azul) y evaposublimación (violeta) anual en el periodo 1961-2015 promediada en el área de estudio: línea discontinua: evolución; línea continua ...	103
Figura 3.4 Diagrama de cajas sobre la evolución de la dinámica de la nieve: a) Fusión acumulada mensual; b) Evaposublimación acumulada mensual; Triángulo azul: evolución creciente, triángulo rojo: evolución decreciente. En ambos casos, la intensidad del color refleja las estaciones con tendencia estadísticamente significativa con un nivel de confianza superior al 90%.....	105
Figura 3.5 (a) Evolución del Equivalente de agua medio (rosa) y máximo (ocre) anual en el periodo 1961-2015 promediada en el área de estudio: línea discontinua: tendencia de la evolución; línea continua: valor medio del periodo de estudio; área sombreada: desviación típica de la variable.....	105

Figura 3.6 Diagrama de cajas sobre la evolución de la dinámica de la nieve: a) Equivalente de agua máximo mensual; b) Equivalente de agua medio mensual; Triángulo azul: evolución creciente, triángulo rojo: evolución decreciente. En ambos casos, la intensidad del color refleja las estaciones con tendencia estadísticamente significativa con un nivel de confianza del 90%.	Error! Marcador no definido.
Figura 3.7 Valores distribuidos y promediados de la variable indicadora de la persistencia del régimen de la nieve días con nieve en superficie a escala decenal en el periodo analizado comprendido entre 1961-2015.....	107
Figura 3.8 (a) Evolución del número de días con nieve en superficie (verde) y Superficie Cubierta de Nieve media (salmón) anual en el periodo 1961-2015 promediada en el área de estudio: línea discontinua: tendencia de la evolución; línea continua: valor medio del periodo de estudio; área sombreada: desviación típica de la variable. (b) mapa distribuido del valor medio de días con nieve en superficie (c) tendencias distribuidas en el área de estudio para la variable de días con nieve en superficie (d) mapa de la desviación típica distribuida para la variable de días con nieve en superficie 1961-2015.....	109
Figura 3.9 Diagrama de cajas sobre la evolución de la dinámica de la nieve: a) Días con nieve en superficie al mes; b) Superficie Cubierta de nieve media mensual. Triángulo azul: evolución creciente, triángulo rojo: evolución decreciente. En ambos casos, la intensidad del color refleja las estaciones con tendencia estadísticamente significativa con un nivel de confianza superior al 90%.	110
Figura 3.10 Distribución regional en Sierra Nevada de los valores medios en las variables analizadas junto con los valores de las décadas medias durante el periodo analizado 1961-2015.....	112
Figura 3.11 Condiciones de aridez (Ian*) vs importancia relativa adimensionalizada de los flujos de masa en la capa de nieve F** (fila superior) y E** (fila inferior) por regiones para todo el periodo (columna derecha) y por décadas para cada región y para toda el área (aspas negras) (columna izquierda).	113
Figura 3.12 DíasNS* vs importancia relativa adimensionalizada de los flujos de masa en la capa de nieve F** (fila superior) y E** (fila inferior) por regiones para todo el periodo (columna derecha) y por décadas para cada región y para toda el área (aspas negras) (columna izquierda).....	114
Figura 3.14 DPn* vs importancia relativa adimensionalizada de los flujos de masa en la capa de nieve F** (fila superior) y E** (fila inferior) por regiones para todo el periodo (columna derecha) y por décadas para cada región y para toda el área (aspas negras) (columna izquierda).	115
Figura 4.1 Evolución de la anomalía media anual (a,c) de la temperatura media, máxima y mínima diaria; y a escala decenal de la máxima, media y mínima (b,d) para los dos escenarios de cambio climático analizados, respectivamente para el periodo 2006-2100. Test de significancia estadística es aplicado al análisis de tendencias anual siendo: (1) significancia del $\alpha = 0,01$ (***); (2) significancia del $\alpha = 0,05$ (**); (3) significancia del $\alpha = 0,1$ (*); o (4) sin significancia, $\alpha > 0,1$ (+).	121
Figura 4.2 Evolución de la anomalía media anual (a,c) de la precipitación anual; y a escala decenal de la máxima, media y mínima (b,d) para los dos escenarios de cambio climático analizados, respectivamente para el periodo 2006-2100. Test de significancia estadística es aplicado al análisis de tendencias anual siendo: (1) significancia del $\alpha = 0,01$ (***); (2) significancia del $\alpha = 0,05$ (**); (3) significancia del $\alpha = 0,1$ (*); o (4) sin significancia, $\alpha > 0,1$ (+).	122
Figura 4.3 Distribución espacial de la temperatura media diaria anual y la precipitación anual para los dos escenarios futuros analizados para el periodo 2006-2010 en el área de estudio.	123
Figura 4.4 Distribución espacial de las anomalías medias anuales (a, b) y tendencias anuales (c, d) para los dos escenarios analizados durante el periodo 2006-2100 en el área de estudio.	124
Figura 4.5 Evolución anual de las anomalías anuales de la precipitación en forma de nieve durante el periodo futuro de estudio 2000-2100 para (a) RCP4.5 y (b) RCP8.5, promediadas en cada región de Sierra Nevada y en toda el área de estudio; anomalías anuales de la precipitación en forma de nieve promediadas en cada región en comparación con las anomalías promediadas en toda el área de estudio en el caso de (c) RCP4.5, (d) RCP8.5.	126

Figura 4.6 Evolución anual (a,c) y por décadas (c,d) de los días con precipitación en forma de nieve durante el periodo futuro de estudio 2006-2100 para (a) RCP4.5 y (b) RCP8.5, promediadas en cada región de Sierra Nevada y en todas las regiones del área de estudio.....	127
Figura 4.7 Evolución anual y por décadas del IAp para los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 en el área de SN para el periodo de estudio 2006-2100. Para ambas escalas temporales análisis por regiones (R1: rojo; R2: naranja; R3: verde oliva; R4: turquesa; R5: azul; Total: negro). Evolución obtenida en cada una de las regiones a escala de década: triángulo rojo: evolución decreciente; triángulo azul: evolución creciente. (Triángulo relleno, tendencia estadística con significancia $\alpha = 0.1$).	129
Figura 4.8 Distribución media anual de IAp para los escenarios seleccionados en el periodo de estudio 2006-2100.....	130
Figura 4.9 Evolución anual y por décadas del ITp para los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 en el área de Sierra Nevada para el periodo de estudio 2006-2100.	131
Figura 4.10 Evolución anual y por décadas del IAN para los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 en el área de Sierra Nevada para el periodo de estudio 2006-2100. Para ambas escalas temporales análisis por regiones (R2: naranja; R5: azul; Total: negro). Evolución obtenida en cada una de las regiones a escala de década: triángulo rojo: evolución decreciente; triángulo azul: evolución creciente. (Triángulo relleno, tendencia estadística con significancia $\alpha = 0.1$).	132
Figura 4.11 Mapa del área de estudio de la evolución del IAn al año medio para los escenarios seleccionados en el periodo de estudio 2006-2100.....	134
Figura 4.12 Evolución anual y por décadas del ITN para los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 en el área de Sierra Nevada para el periodo de estudio 2006-2100.	135
Figura 4.13 Evolución de las anomalías en los flujos de agua en la capa de nieve, fusión y evapsublimación, para el periodo futuro en ambos escenarios para la región R5 Guadalfeo.....	136
Figura 4.14 Evolución de las anomalías en los flujos de agua en la capa de nieve, fusión y evapsublimación, para el periodo futuro en ambos escenarios para la región R2 Andarax.....	137
Figura 4.15 Mapa promedio de anomalías para los flujos de fusión para las regiones (R5 y R2) y los dos escenarios seleccionados.	139
Figura 4.16 Mapa promedio de anomalías para los flujos de evapsublimación para las regiones (R5 y R2) y los dos escenarios futuros seleccionados.	140
Figura 4.17 Evolución del equivalente de agua diario máximo (EA max) y medio (EA medio) en término de anomalía anual durante el periodo futuro en la región R5-Guadalfeo.....	141
Figura 4.18 Evolución del equivalente de agua diario máximo (EA max) y medio (EA medio) en término de anomalía anual durante el periodo futuro en la región R5-Guadalfeo.....	142
Figura 4.19 Evolución de la superficie cubierta de nieve máxima (SCN max) y media (SCN medio) anual durante el periodo de futuro en la región R5 Guadalfeo. Evolución obtenida en cada una de las regiones a escala de década: triángulo rojo: evolución decreciente; triángulo azul: evolución creciente. (Triángulo relleno, tendencia estadística con significancia $\alpha = 0.1$).	144
Figura 4.20 Evolución de la superficie cubierta de nieve máxima (SCN max) y media (SCN medio) anual durante el periodo de futuro en la región R2 Andarax. Evolución obtenida en cada una de las regiones a escala de década: triángulo rojo: evolución decreciente; triángulo azul: evolución creciente. (Triángulo relleno, tendencia estadística con significancia $\alpha = 0.1$).	145
Figura 4.21 Mapas de las regiones de estudio del número de días con nieve al año medio en el periodo de estudio (2006-2100) para los escenarios seleccionados.	147
Figura 4.22 Distribución regional en Sierra Nevada de los valores medios anuales de las anomalías para las variables meteorológica analizadas, junto con su tendencia media global durante el futuro periodo de estudio 2006-2100 para ambos escenarios RCP4.5 y RCP8.5.....	150

Figura 4.23 Distribución regional en Sierra Nevada de los valores medios anuales de las anomalías para las variables asociadas a la dinámica de la nieve, junto con su tendencia media global durante el futuro periodo de estudio 2006-2100 para ambos escenarios RCP4.5 y RCP8.5..... 151

Lista de Tablas

Tabla i Área y altitud media de las cinco regiones en la que se ha dividido el área de estudio.....	5
Tabla ii Estaciones meteorológicas seleccionadas para este estudio ordenadas según valores crecientes de cota (ID: n° identificación; Z: altitud, m s.n.m.; Región, R1 a R5 según zonificación mostrada en la figura 1; Var.:Variable disponible, P-precipitación diaria, T-temperatura diaria)	8
Tabla 1.1 Estadísticos del régimen de precipitación para cada región (Fig. zona de estudio) en el área de estudio, junto con las tendencias medias anuales obtenidas durante el periodo analizado 1961-2015. Los resultados del análisis de tendencias se definen según la prueba de Mann-Kendall como (1) significancia del $\alpha=0,01$ (**); (2) significancia del $\alpha=0,05$ (**); (3) significancia del $\alpha=0,1$ (*); o (4) sin significancia, $\alpha>0,1$ (+)	33
Tabla 1.2 Estadísticos de temperatura de cada región (Fig. zona de estudio) en el área de estudio, junto con las tendencias medias anuales obtenidas durante el periodo analizado 1961-2015. Los resultados del análisis de tendencias se definen según la prueba de Mann-Kendall como (1) significancia del $\alpha=0,01$ (**); (2) significancia del $\alpha=0,05$ (**); (3) significancia del $\alpha=0,1$ (*); o (4) sin significancia, $\alpha>0,1$ (+).....	46
Tabla 1.3 Error cometido en la estimación de la precipitación en forma de nieve por el método TNS para la escala horaria y diaria para las temperaturas Tmax, Tmed y Tmin en términos absolutos (Pnieve(mm)) y en porcentaje sobre el total para todo el periodo analizado (ϵ)	49
Tabla 1.4 Estadísticos del régimen de precipitación en forma de nieve para cada región (Fig. zona de estudio) en el área de estudio, junto con las tendencias medias anuales obtenidas durante el periodo analizado 1961-2015. Los resultados del análisis de tendencias se definen según la prueba de Mann-Kendall como (1) significancia del $\alpha=0,01$ (**); (2) significancia del $\alpha=0,05$ (**); (3) significancia del $\alpha=0,1$ (*); o (4) sin significancia, $\alpha>0,1$ (+)	53
Tabla 2.1 Tabla resumen de los índices definidos clasificados en función de su objeto en este estudio....	64
Tabla 2.2 Tabla resumen de los índices definidos, en las distintas escalas espaciales (puntual o distribuido) en las que se va a mostrar y analizar en este capítulo.	65
Tabla 2.3 Tabla resumen de los valores medios del índice Dsp durante el periodo 1961-2015 en las regiones en las que se divide la zona de estudio (R1-R5) y todo el área analizada (Total) junto con las tendencias anuales asociadas. Los resultados del análisis de tendencias se definen según el test de Mann-Kendall como (1) significancia del $\alpha=0,01$ (**); (2) significancia del $\alpha=0,05$ (**); (3) significancia del $\alpha=0,1$ (*); o (4) sin significancia, $\alpha>0,1$ (+).	68
Tabla 2.4 Tabla resumen de los valores medios del índice IAp durante el periodo 1961-2015 en las regiones en las que se divide la zona de estudio (R1-R5) y toda el área analizada (Total) junto con las tendencias anuales asociadas. Los resultados del análisis de tendencias se definen según el test de Mann-Kendall como (1) significancia del $\alpha=0,01$ (**); (2) significancia del $\alpha=0,05$ (**); (3) significancia del $\alpha=0,1$ (*); o (4) sin significancia, $\alpha>0,1$ (+).	69
Tabla 2.5 Tabla resumen de los valores medios del índice ITp durante el periodo 1961-2015 en las regiones en las que se divide la zona de estudio (R1-R5) y todo el área analizada (Total) junto con las tendencias anuales asociadas. Los resultados del análisis de tendencias se definen según el test de Mann-Kendall como (1) significancia del $\alpha=0,01$ (**); (2) significancia del $\alpha=0,05$ (**); (3) significancia del $\alpha=0,1$ (*); o (4) sin significancia, $\alpha>0,1$ (+).	71
Tabla 2.6 Tabla resumen de los valores medios del índice Ip durante el periodo 1961-2015 en las regiones en las que se divide la zona de estudio (R1-R5) y toda el área analizada (Total) junto con las tendencias anuales asociadas. Los resultados del análisis de tendencias se definen según el test de Mann-Kendall como (1) significancia del $\alpha=0,01$ (**); (2) significancia del $\alpha=0,05$ (**); (3) significancia del $\alpha=0,1$ (*); o (4) sin significancia, $\alpha>0,1$ (+).	74

Tabla 2.7 Tabla resumen de los valores medios del índice Dsn durante el periodo 1961-2015 en las regiones en las que se divide la zona de estudio (R1-R5) y toda el área analizada (Total) junto con las tendencias anuales asociadas. Los resultados del análisis de tendencias se definen según el test de Mann-Kendall como (1) significancia del $\alpha=0,01$ (***) (2) significancia del $\alpha=0,05$ (**); (3) significancia del $\alpha=0,1$ (*); o (4) sin significancia, $\alpha>0,1$ (+).	79
Tabla 2.8 Tabla resumen de los valores medios del índice IAn durante el periodo 1961-2015 en las regiones en las que se divide la zona de estudio (R1-R5) y todo el área analizada (Total) junto con las tendencias anuales asociadas. Los resultados del análisis de tendencias se definen según el test de Mann-Kendall como (1) significancia del $\alpha=0,01$ (***) (2) significancia del $\alpha=0,05$ (**); (3) significancia del $\alpha=0,1$ (*); o (4) sin significancia, $\alpha>0,1$ (+).	81
Tabla 2.9 Tabla resumen de los valores medios del índice ITn durante el periodo 1961-2015 en las regiones en las que se divide la zona de estudio (R1-R5) y todo el área analizada (Total) junto con las tendencias anuales asociadas. Los resultados del análisis de tendencias se definen según el test de Mann-Kendall como (1) significancia del $\alpha=0,01$ (***) (2) significancia del $\alpha=0,05$ (**); (3) significancia del $\alpha=0,1$ (*); o (4) sin significancia, $\alpha>0,1$ (+).	82
Tabla 2.10 Tabla resumen de los valores medios del índice In durante el periodo 1961-2015 en las regiones en las que se divide la zona de estudio (R1-R5) y todo el área analizada (Total) junto con las tendencias anuales asociadas. Los resultados del análisis de tendencias se definen según el test de Mann-Kendall como (1) significancia del $\alpha=0,01$ (***) (2) significancia del $\alpha=0,05$ (**); (3) significancia del $\alpha=0,1$ (*); o (4) sin significancia, $\alpha>0,1$ (+).	84
Tabla 3.1 Estadísticos de la fusión y la evaposublimación de la nieve para cada región (R1-R5) y para todo el área de estudio (Total), junto con las tendencias medias anuales obtenidas durante el periodo analizado 1961-2015. Los resultados del análisis de tendencias se definen según el test de Mann-Kendall como (1) significancia del $\alpha=0,01$ (***) (2) significancia del $\alpha=0,05$ (**); (3) significancia del $\alpha=0,1$ (*); o (4) sin significancia, $\alpha>0,1$ (+).	104
Tabla 3.2 Estadísticos de las variables de equivalente de agua en la capa de nieve para cada región (R1-R5) y para todo el área de estudio (Total), junto con las tendencias medias anuales obtenidas durante el periodo analizado 1961-2015. Los resultados del análisis de tendencias se definen según el test de Mann-Kendall como (1) significancia del $\alpha=0,01$ (***) (2) significancia del $\alpha=0,05$ (**); (3) significancia del $\alpha=0,1$ (*); o (4) sin significancia, $\alpha>0,1$ (+).	106
Tabla 3.3 Estadísticos de las variables de persistencia en la capa de nieve analizadas para cada región (R1-R5) y para todo el área de estudio (Total), junto con las tendencias medias anuales obtenidas durante el periodo analizado 1961-2015. Los resultados del análisis de tendencias se definen según el test de Mann-Kendall como (1) significancia del $\alpha=0,01$ (***) (2) significancia del $\alpha=0,05$ (**); (3) significancia del $\alpha=0,1$ (*); o (4) sin significancia, $\alpha>0,1$ (+).	109
Tabla 4.1 Tabla resumen de los índices definidos, en las distintas escalas espaciotemporales para el periodo futuro comprendido entre 2006-2100. A - evolución de la variable analizada a escala anual; D - evolución la distribución por decadal de la variable analizada a escala anual; V - valor anual medio de la variable analizada.	119
Tabla 4.2 Tabla resumen de los valores medios para el periodo de referencia para cada una de las regiones de la zona de estudio de las variables seleccionadas.	120
Tabla 4.3 Tabla resumen de los valores medios de las variables meteorológicas estudiadas durante el periodo 2006-2100 bajo cada uno de los escenarios analizados (RCP4.5 y RCP8.5) en las regiones en las que se divide la zona de estudio (R1-R5) y todo el área analizada (Total) junto con las tendencias anuales asociadas. Los resultados del análisis de tendencias se definen según el test de Mann-Kendall como (1) significancia del $\alpha=0,01$ (***) (2) significancia del $\alpha=0,05$ (**); (3) significancia del $\alpha=0,1$ (*); o (4) sin significancia, $\alpha>0,1$ (+).	124
Tabla 4.4 Valores estadísticos para el índice IAp en el periodo 2006-2100 para los escenarios de estudio en el área de Sierra Nevada: Tendencias medias anuales globales, valores medios, valores máximos y	

valores mínimos. Los resultados del análisis de tendencias se definen según el test de Mann-Kendall como (1) significancia del $\alpha=0,01$ (***) (2) significancia del $\alpha=0,05$ (**); (3) significancia del $\alpha=0,1$ (*); o (4) sin significancia, $\alpha>0,1$ (+).	128
Tabla 4.5 Valores estadísticos en los umbrales seleccionados para el índice ITp en el periodo 2006-2100 para los escenarios de estudio en el área de Sierra Nevada: Tendencias medias anuales globales, valores medios, valores máximos y valores mínimos. Los resultados del análisis de tendencias se definen según el test de Mann-Kendall como (1) significancia del $\alpha=0,01$ (***) (2) significancia del $\alpha=0,05$ (**); (3) significancia del $\alpha=0,1$ (*); o (4) sin significancia, $\alpha>0,1$ (+).	131
Tabla 4.6 Valores estadísticos para el índice IAn en el periodo 2006-2100 para los escenarios de estudio en el área de Sierra Nevada: Tendencias medias anuales globales, valores medios, valores máximo y valores mínimos. Los resultados del análisis de tendencias se definen según el test de Mann-Kendall como (1) significancia del $\alpha=0,01$ (***) (2) significancia del $\alpha=0,05$ (**); (3) significancia del $\alpha=0,1$ (*); o (4) sin significancia, $\alpha>0,1$ (+).	133
Tabla 4.7 Valores estadísticos en los umbrales seleccionados para el índice ITn en el periodo 2006-2100 para los escenarios de estudio en el área de Sierra Nevada: Tendencias medias anuales globales, valores medios, valores máximos y valores mínimos. Los resultados del análisis de tendencias se definen según el test de Mann-Kendall como (1) significancia del $\alpha=0,01$ (***) (2) significancia del $\alpha=0,05$ (**); (3) significancia del $\alpha=0,1$ (*); o (4) sin significancia, $\alpha>0,1$ (+).	134
Tabla 4.8 Tabla resumen de los valores medios de los flujos de masa en la capa de nieve estudiadas durante el periodo 2006-2100 bajo cada uno de los escenarios analizados (RCP4.5 y RCP8.5) en las regiones de interés (R2 y R5) junto con las tendencias anuales asociadas. Los resultados del análisis de tendencias se definen según el test de Mann-Kendall como (1) significancia del $\alpha=0,01$ (***) (2) significancia del $\alpha=0,05$ (**); (3) significancia del $\alpha=0,1$ (*); o (4) sin significancia, $\alpha>0,1$ (+).	138
Tabla 4.9 Tabla resumen de los valores de equivalente de agua analizados en la capa de nieve estudiadas durante el periodo 2006-2100 bajo cada uno de los escenarios analizados (RCP4.5 y RCP8.5) en las regiones de interés (R2 y R5) junto con las tendencias anuales asociadas. Los resultados del análisis de tendencias se definen según el test de Mann-Kendall como (1) significancia del $\alpha=0,01$ (***) (2) significancia del $\alpha=0,05$ (**); (3) significancia del $\alpha=0,1$ (*); o (4) sin significancia, $\alpha>0,1$ (+).	143
Tabla 4.10 Tabla resumen de los valores que analizan la persistencia en la capa de nieve estudiadas durante el periodo 2006-2100 bajo cada uno de los escenarios analizados (RCP4.5 y RCP8.5) en las regiones de interés (R2 y R5) junto con las tendencias anuales asociadas. Los resultados del análisis de tendencias se definen según el test de Mann-Kendall como (1) significancia del $\alpha=0,01$ (***) (2) significancia del $\alpha=0,05$ (**); (3) significancia del $\alpha=0,1$ (*); o (4) sin significancia, $\alpha>0,1$ (+).	146
Tabla 4.11. Ratio entre la media de los valores absolutos de los dos escenarios analizados para cada una de las variables de interés a lo largo del periodo futuro de estudio (RCP4.5/RCP8.5)	149

Resumen

En el contexto actual de cambio global, las zonas montañosas constituyen lugares singulares en los que estos cambios del régimen climático pueden ser rastreados. La detección temprana de cambios significativos en las variables del estado de la nieve en regiones semiáridas puede ayudar a evaluar los impactos de la variabilidad climática y la dinámica futura de la nieve en las latitudes septentrionales. Esta importancia es mayor en las regiones semiáridas, donde la alta variabilidad de los regímenes climáticos anuales y estacionales suele ser mayor. A pesar de que las observaciones en estos ambientes no concluyen en una disminución significativa de la precipitación sobre una base anual, varios trabajos señalan tendencias de aumento de la torrencialidad de las precipitaciones en las escalas estacionales y basadas en eventos, que en gran parte impacta en la ocurrencia y persistencia de las nevadas y, por lo tanto, el régimen hidrológico.

Este estudio propone, evaluar las tendencias observadas climáticas y su impacto en los flujos de agua y energía en la capa de nieve en el área de Sierra Nevada, sur de España, como zona representativa de alta montaña mediterránea a diferentes escalas temporales y espaciales, tanto para el periodo histórico de observaciones disponibles como para escenarios de clima futuro.

En primer lugar se presenta, los resultados obtenidos para el análisis de tendencias del régimen de precipitación en forma de nieve durante el periodo 1961-2015. Para ello, serie de datos diarios observados de precipitación y temperatura han sido utilizados para la obtención del régimen de precipitación en forma de nieve. El análisis se realiza a diferentes escalas temporales (década, año y mes), con el fin de conocer la evolución y la distribución de los procesos a lo largo del año hidrológico, y a diferentes escalas espaciales, con el fin de realizar una zonificación que permita identificar las zonas vulnerables a los cambios. La ocurrencia y persistencia de estos regímenes de precipitación y precipitación en forma de nieve se analizan, además, para identificar la ocurrencia torrencialidad y aridez en la zona.

Los resultados obtenidos de la primera parte son la base para el posterior estudio del impacto asociado a la dinámica de la nieve. Por un lado, el balance de agua y energía en la capa de nieve es analizado en el periodo 1961-2015 haciendo uso de un modelo distribuido de base física implementado en la zona (WiMMed). Por último, los impactos en el periodo futuro (2006-2100) se evalúan para los regímenes, regímenes meteorológico y níveo, en dos escenarios de emisiones en base al quinto informe del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (AR5 - IPPC).

Los resultados aportan una evaluación de los cambios meteorológicos históricos observados en variables significativas relacionadas con la nieve, e identifican los cambios en el régimen de precipitación como los más directamente relacionados con la pérdida de precipitación en forma de nieve en las últimas décadas. La zonificación realizada dentro del área de estudio, ha permitido identificar zonas según su vulnerabilidad frente a los cambios en la presencia de nieve. Su fin último es además proveer de información rigurosa para evaluar los impactos hidrológicos y de gestión de recursos hídricos, y otros derivados, del calentamiento global en estas zonas y generar las bases de estrategias y planes de adaptación.

INTRODUCCIÓN

Aproximadamente mil millones de personas en el mundo dependen del agua de fusión de nieve para satisfacer sus demandas (i.e. producción hidroeléctrica, abastecimiento, riego, etc...). Se trata de agua procedente principalmente de nieve estacional que se acumula cada año en montañas localizadas en latitudes medias (Barnett, 2005; Huss *et al.*, 2017; Musselman *et al.*, 2017). Dentro de estas zonas montañosas, aun no siendo las más representativas en términos absolutos en volumen de nieve pero quizás sí en términos relativos del balance hídrico, se encuentran las montañas localizadas en áreas mediterráneas (Fayad *et al.*, 2017), mostradas en la Figura i, i.e. Montes Atlas (Marruecos, Marchane *et al.*, 2015), Sierra Nevada y Pirineos (España, Lopez-Moreno *et al.*, 2009; Perez-Palazón *et al.*, 2018), estribaciones sur de Los Alpes (Francia e Italia; Beniston 2012; Valt y Cianfarra, 2010), Monte Etna (Italia, Senatore *et al.*, 2011), Alpes Dináricos (Croacia, Zebre, 2015), Montes Taurus (Turquía, Kaniewski *et al.*, 2007), Cordillera Líbano (Líbano; Mhawej *et al.*, 2014), La Sierra Nevada (EE.UU., Molotch y Meromy, 2014) o Los Andes (Chile, Favier *et al.*, 2014; Valdés-Pineda *et al.*, 2014).

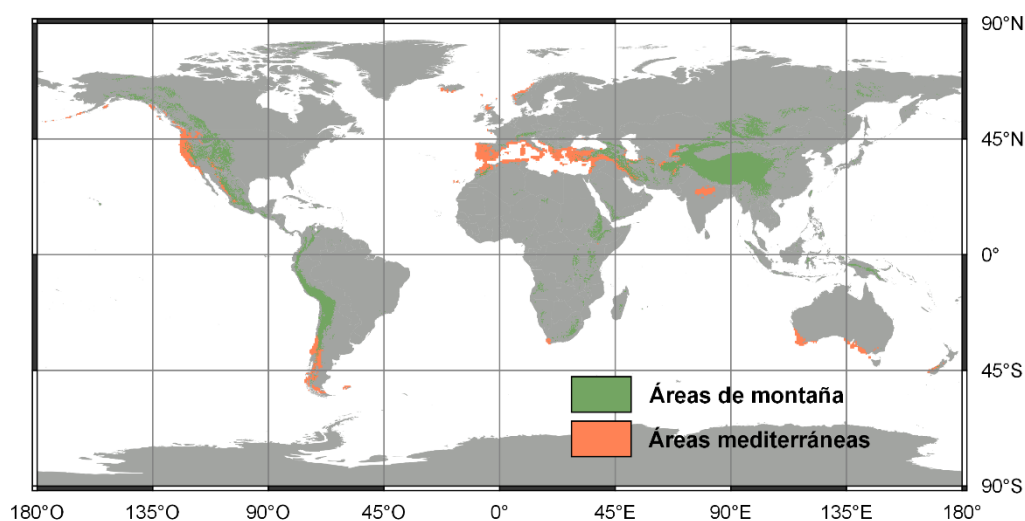


Figura i Distribución global de zonas de montañas y áreas de clima mediterráneo en el mundo.

Su localización implica que el típico clima alpino característico de zonas de montaña se vea modificado por la influencia del clima mediterráneo presente en las partes más bajas de dichas áreas, caracterizado por altos niveles de radiación solar a lo largo del año, carácter variable de la precipitación, que es comúnmente torrenciales durante finales del verano, y temperaturas estivales muy altas que favorecen la aparición recurrente de sequías estacionales. Esta interacción entre condiciones climáticas alpinas y mediterráneas genera unas características singulares que dotan de un alto valor medioambiental a sus ecosistemas, siendo en muchos casos zonas protegidas debido al número elevado de endemismos (Myers *et al.*, 2000), con un papel muy relevante de la dinámica de la nieve en estas zonas. Entre otras características de su régimen, cabe destacar la ocurrencia habitual de varios ciclos de acumulación/ablación durante la estación de nieve (Pimentel *et al.*, 2015), una significativa tasa de sublimación de la nieve (Herrero *et al.*, 2016) y la peculiar distribución de la nieve en manchas aisladas (Anderton *et al.*, 2004; Pimentel *et al.*, 2017b) influenciadas por la interacción entre la microtopografía (1-1000 mm) y la capa de nieve (Sturm y Holmgren, 1994; Menard *et al.*, 2014; Pimentel *et al.*, 2017a) que en determinadas localizaciones perduran incluso durante el período estival. Todas estas características aumentan la dificultad en la monitorización y el modelado del comportamiento y distribución de la nieve, lo cual a menudo requiere una aproximación desde la base física de los

procesos dominantes a la hora de caracterizar el régimen de evolución de la capa de nieve (Herrero *et al.*, 2009; Polo *et al.*, 2019).

Sierra Nevada, cadena montañosa al sur de España, constituye un ejemplo representativo de este tipo de zonas a pesar de su superficie no muy extensa, dado su elevado gradiente topográfico y su cercanía a la costa mediterránea. Se trata de una “isla de nieve” en una región eminentemente semiárida con una muy elevada variabilidad espacial marcada, además de por la topografía, por los gradientes este-oeste y norte-sur. Esta naturaleza ha motivado que forme parte de la Red Mundial de Observatorios de Cambio Climático (Möller *et al.*, 2011), así como una multitud de valores ambientales que han merecido su aprobación como Parque Natural y Parque Nacional, Reserva de la Biosfera, y otras figuras de protección. Los diferentes escenarios plausibles de evolución futura del clima local y su impacto en la aparición y persistencia de la nieve no sólo afectan al régimen hidrológico (Danco *et al.*, 2016; López-Moreno *et al.*, 2017) de la zona, sino que también suponen un riesgo para los ecosistemas interrelacionados con la nieve y para las numerosas especies endémicas identificadas en el parque (Heywood, 1996; Blanca *et al.*, 1998). Así, estas zonas montañosas además pueden ser vistas como laboratorios naturales donde los impactos del calentamiento global pueden ser claramente apreciables en la capa de nieve y, por tanto, evaluados en una fase temprana (Beniston, 2003). El análisis de tendencias locales de aquellos descriptores más relevantes del régimen de la nieve y de su evolución a diferentes escalas temporales constituye un primer y necesario paso para el estudio del impacto asociado en otros procesos físicos, químicos y biológicos, ecológicos y, también, socioeconómicos.

Este trabajo aborda el estudio del impacto de las tendencias climáticas sobre el régimen de la capa de nieve en Sierra Nevada como zona representativa de alta montaña mediterránea a diferentes escalas temporales y espaciales, tanto para el periodo histórico de observaciones disponibles como para escenarios de clima futuro. Su fin último es además proveer de información rigurosa para evaluar los impactos hidrológicos y de gestión de recursos hídricos, y otros derivados, del calentamiento global en estas zonas y generar las bases de estrategias y planes de adaptación. Para ello, presenta en primer lugar (Bloque I) los resultados obtenidos para el análisis de tendencias del régimen de precipitación en forma de nieve durante el periodo 1961-2015, que son la base para el estudio posterior del impacto sobre el balance de agua y energía en la capa de nieve y sobre el régimen de nieve asociado a escenarios de clima futuro local (Bloque II). De forma previa a estos dos bloques se introducen las características de la zona y la información disponible utilizada para el estudio, así como el modelo de dinámica de la nieve implementado en la zona.

Zona de estudio

Sierra Nevada es una cadena montañosa perteneciente al sistema Penibético y situada al sureste de España (37°6'0''N; 3° 5' 24''W) entre las provincias de Granada y Almería, con una longitud de aproximadamente 80 km en la dirección Este-Oeste y 27 km de ancho en la dirección Norte-Sur (Figura ii). Esta cordillera, que incluye el pico más alto de toda la península Ibérica (Mulhacén, 3479 m s.n.m.) a sólo 40 km de la costa, segundo más alto de toda Europa (solo superado por los Alpes), discurre de manera paralela a la costa del Mar Mediterráneo. Como se ha indicado, la zona presenta una topografía escarpada, caracterizada por fuertes desniveles altitudinales y una gran variedad de ecosistemas asociados. Es considerada un refugio natural que cuenta con las mayores riquezas en biodiversidad vegetal de toda Europa y ecosistemas únicos en el mundo, no propia de latitudes mediterráneas (Heywood, 1995; Blanca, 1996; Anderson *et al.*, 2011). Contiene 169239 hectáreas protegidas con la máxima figura

jurídica y ambiental: es Reserva de La Biosfera desde 1986, Parque Natural desde 1989 y Parque Nacional (86208 ha) desde 1999 (BOE, nº 11, de 13 de enero de 1999). Figura entre las 28 Reservas de la Biosfera de Montaña mundiales seleccionadas por la UNESCO para participar en la Red Internacional “Glochamora” para el seguimiento del Cambio Climático Global en diferentes zonas montañosas del planeta. Su elevada altitud a baja latitud la convierte en un enclave especial para el observatorio natural del cambio global en Europa.

En lo que a flora se refiere, se encuentran cubiertas típicas de alta montaña, pastos y arbustos bajos, de forma predominante en la zona. El principal arbusto es *Hormathophyllaspinosa*, con una presencia relevante también de *Genista versicolor* y *Fetuscaclemetei* (Lorite *et al.*, 2007). Constituyen dos arbustos bajos compactos y densamente ramificados que crecen muy juntos formando una cobertura extremadamente compacta, baja y continua, que actúa como aislante entre el suelo y la nieve (Anderson *et al.*, 2011). Los árboles no son comunes en el área afectada por la nieve; se reducen a parches aislados de pinos reforestados.

En relación al clima, el régimen de precipitación anual es altamente variable y oscila (periodo 1960-2000) aproximadamente entre valores medios de 1000 mm para años húmedos y 200 mm en años secos, con un valor promedio de 510 mm al año (Pérez-Palazón *et al.*, 2015). El régimen de temperatura es también cambiante con valores de 26, 12.5 y 0.4 °C para la máxima, media y mínima temperatura media diaria en dicho periodo (Pérez-Palazón *et al.*, 2015). La ocurrencia de nieve aparece en altitudes superiores a los 1000 m s.n.m. siendo más persistente en altitudes superiores a los 2000 m s.n.m. desde el mes de noviembre al mes de mayo (Pimentel *et al.*, 2017b), con la sucesión de varios ciclos de acumulación-ablación durante la época de nieve. Esto da como resultado una distribución espacial heterogénea a lo largo de los años.

Para este estudio, el área de Sierra Nevada y su zona de influencia ha sido dividida en cinco regiones (R1 a R5) coincidentes con las cabeceras de las cuencas de los principales ríos en la zona (Figura 2): Adra (R1), Andarax (R2), Fardes (R3), Genil (R4) y Guadalfeo (R5). Esta regionalización es representativa de los gradientes Norte - Sur (R3-R4, R1-R5), caracterizados por influencia del mar Mediterráneo, y Este - Oeste (R2, R3-R1, R4-R5), caracterizado por las dinámicas atlánticas/mediterráneas. Las regiones R3 y R4 se localizan en la vertiente norte de Sierra Nevada y forman parte de las cuencas de cabecera del río Guadalquivir, mientras que las cuencas localizadas en la vertiente sur, R1 y R5, junto con R2 al este (que incluye además cabeceras de las Sierras de Bazay Andaraz) son cuencas vertientes al mar pertenecientes a la Demarcación Hidrográfica de las Cuencas Mediterráneas Andaluzas.

Tabla i Área y altitud media de las cinco regiones en la que se ha dividido el área de estudio

	ADRA	ANDARAX	FARDES	GENIL	GUADALFEO
Área (km ²)	459.13	1169.00	914.43	983.16	1058.0
Altitud media (m)	1330.6	1235.0	1350.0	1270.6	1418.5

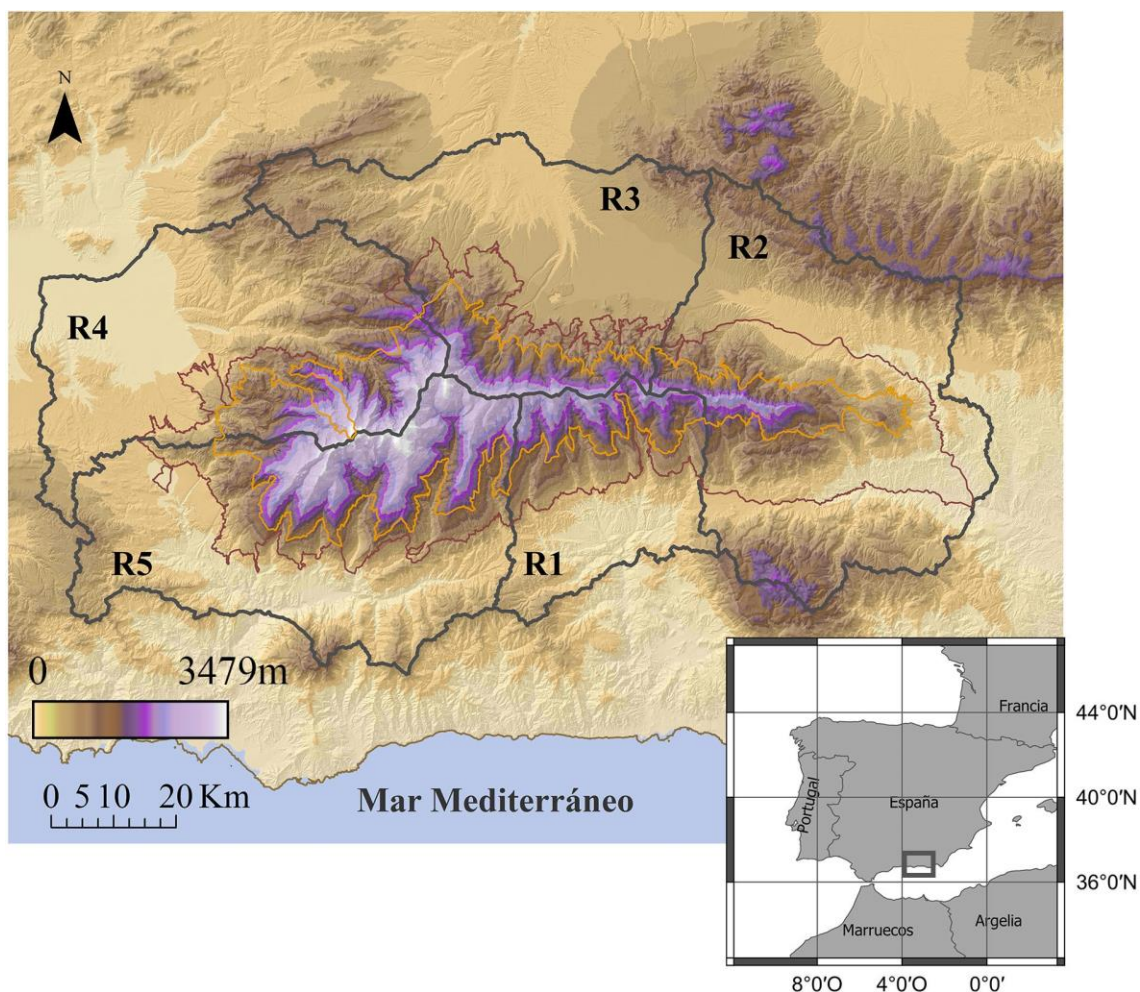


Figura ii Localización del área de Sierra Nevada en España junto con el modelo digital de elevaciones del área de estudio y sus regiones en el mismo. Límites de las zonas protegidas: Parque Nacional (línea ocre) y Parque Natural (línea burdeos); límites de las cinco regiones en las que el área de estudio ha sido dividida (línea negra): R1 - Adra, R2 - Andarax, R3 -Fardes, R4 - Genil y R5 - Guadalfeo.

Recursos disponibles para el estudio

Información climática: series de datos históricos

La Figura iii muestra la ubicación de las estaciones meteorológicas que se encuentran en la zona de estudio y sus inmediaciones. La información disponible, en su mayoría de acceso libre, es gestionada por diferentes instituciones públicas (AEMET, IFAPA, Organismos de Parques Nacionales, Consejería de Medio Ambiente-Junta de Andalucía, Instituto Interuniversitario de Investigación del Sistema Tierra), responsables de actualizar y mantener dichos datos. En estas estaciones, las principales variables registradas son precipitación y temperatura a una resolución temporal diaria. Sin embargo, algunas de las redes también proporcionan registros de alguna combinación de otras variables meteorológicas de interés (i.e. radiación incidente, tanto de onda corta como larga, humedad relativa del aire/presión de vapor o velocidad del viento) y/o con mayor frecuencia de registro (escalas horarias o sub-horarias).

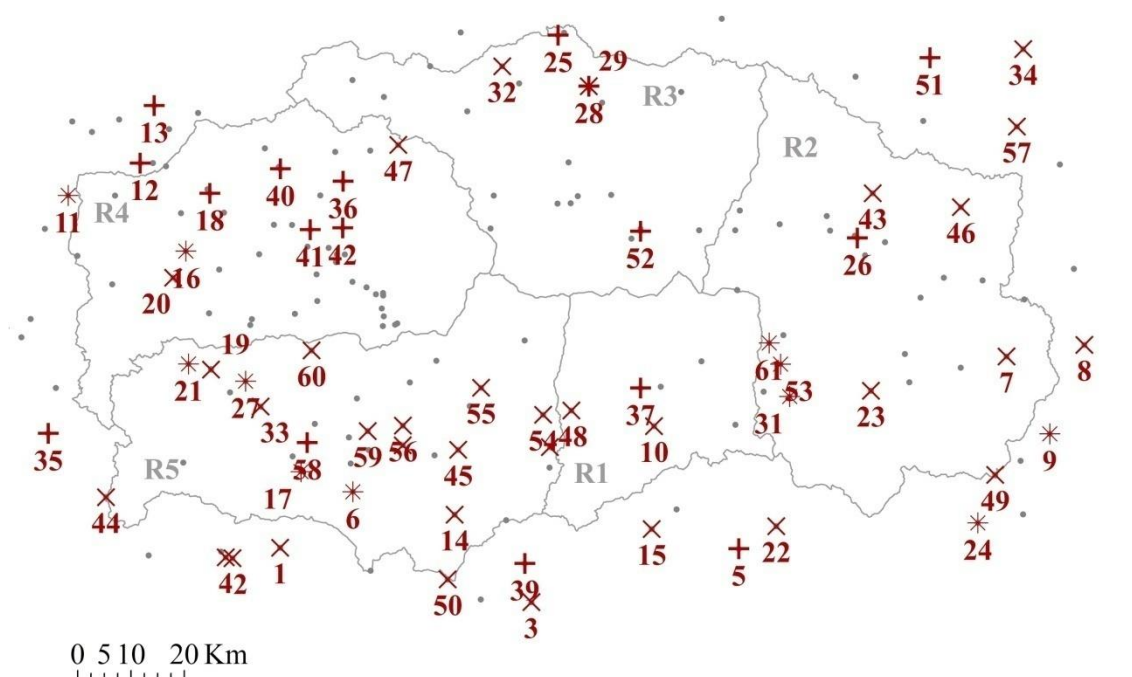


Figura iii. Localización de todas las estaciones meteorológicas disponibles en la zona de estudio (puntos grises), 44 estaciones de precipitación (aspa (X) roja) y 28 estaciones de temperatura (cruz (+) roja) seleccionadas, de las cuales 11 estaciones proporcionan ambas (asterisco (*) rojo). Límites de las cinco regiones en las que el área de estudio ha sido dividida (línea negra): R1 - Adra, R2 - Andarax, R3 - Fardes, R4 - Genil y R5 - Guadalfeo

La importancia que supone la disponibilidad de datos observados en zonas de alta montaña en general y en espacios protegidos en particular, ha sido la causante de que en los últimos años el número de estaciones meteorológicas haya aumentado notablemente hasta alcanzar la distribución actual. Sin embargo, esto hace que la mayor parte de las estaciones no ofrezcan series temporales con duración suficiente para la realización de un análisis a largo plazo, ni siquiera para precipitación o temperatura. A esto se une el vacío habitualmente encontrado en las zonas de mayor altitud donde el difícil acceso hace que su puesta en marcha y mantenimiento resulte muy complicado.

Por este motivo, para este trabajo se han seleccionado las estaciones proporcionadas por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), con series históricas suficientemente largas para la realización de un análisis de tendencias como el propuesto. En total, se han utilizado 44 estaciones de precipitación (Figura iii, aspa roja) y 28 de temperatura (Figura iii, cruz roja) con información a escala diaria durante el periodo 1961-2015. La Tabla ii Estaciones meteorológicas seleccionadas para este estudio ordenadas según valores crecientes de cota (ID: n° identificación; Z: altitud, m s.n.m.; Región, R1 a R5 según zonificación mostrada en la figura 1; Var.: Variable disponible, P-precipitación diaria, T-temperatura diaria) recoge estas estaciones junto con información acerca de su elevación y región en la que se ubican. En la Figura iii se observa la nula disponibilidad de datos en cotas superiores a los 1800 m s.n.m. y la escasa representación de las regiones R1 y R3, principalmente. Se observa cómo para ambas variables existen en ocasiones periodos con ausencia de datos. Estos huecos se han analizado para cada caso individual en función la longitud y la fecha del periodo con falta de datos y han sido rellenados a partir del resto de las estaciones disponibles con correlación (r) suficiente ($r > 0.7$ para precipitación y $r > 0.9$ para temperatura) durante el periodo sin registros, como la combinación lineal ponderada de las observaciones correspondientes en el resto de estaciones adoptando pesos individuales proporcionales a la correlación lineal entre las mismas.

Tabla ii Estaciones meteorológicas seleccionadas para este estudio ordenadas según valores crecientes de cota (ID: n° identificación; Z: altitud, m s.n.m.; Región, R1 a R5 según zonificación mostrada en la figura 1; Var.: Variable disponible, P-precipitación diaria, T-temperatura diaria)

ID	Población	Z	Región	Var.	ID	Población	Z	Región	Var.
1	Vélez de Benaudalla	130	R5	P	32	Cortes y Graena, Lopera	930	R3	P
2	Presa de Vélez de Benaudalla	235	R5	P	33	Niguelas	931	R5	P
3	Albuñol	240	R5	P	34	Alcontar	954	R2	P
4	Guájjar, Fondón	262	R5	P	35	Jayena, LosAlauises	970	R5	T
5	Berja	350	R1	T	36	Pantano deQuentar	975	R4	T
6	Órgiva	450	R5	P y T	37	Válor -Nechite	975	R1	T
7	Alboloduy	460	R2	P	38	Pampaneira,Central	1000	R5	P
8	Fuente Santa	460	R2	P	39	Albondón	1015	R5	T
9	Alhama deAlmería	520	R2	P y T	40	Huétor-Santillán, Villa María	1038	R4	T
10	Ugíjar	559	R1	P	41	Presa deCanales	1039	R4	T
11	Granada,Aeropuerto	570	R4	P y T	42	Guejar-Sierra	1084	R4	T
12	Atarfe, SEA	610	R4	T	43	Abrucena, LosJarales	1100	R2	P
13	Pantano Cubillas	630	R4	T	44	Albuñuelas,Huida	1120	R5	P
14	Torvizcón	684	R5	P	45	Portugos	1120	R5	P
15	Turón	684	R1	P	46	Nacimiento,Gilma Moderno	1190	R2	P
16	Granada, BaseAérea	685	R4	P y T	47	Quentar, Tocón	1200	R4	P
17	Lanjarón	710	R5	P y T	48	MecinaBombaron	1200	R1	P
18	Granada,Cartuja	720	R4	T	49	Alhama deAlmería, La Zarba	1219	R2	P
19	Padul,Aguadero	740	R5	P	50	AlbuñolaÓrgiva, C.P.C.	1240	R5	P
20	Alhendín,I.N.M.	745	R4	P	51	Caniles, C.Fraile	1260	R2	T
21	Padul	753	R5	P y T	52	Aldeire,I.N.M.	1270	R3	T
22	Berja, Castala	800	R1	P	53	Láujar,Monterrey	1280	R2	P y T
23	Canjajar,Vivero	800	R2	P	54	Bérchules	1319	R5	P
24	Cristal	812	R2	P y T	55	Trévez	1476	R5	P
25	Félix	840	R3	T	56	Poqueira,Central	1530	R5	P
26	BenaluadeGuadixZ ayete	840	R3	T	57	Eléctrica	1530	R5	P
27	Abla	885	R2	T	58	Los Santos	1600	R2	P
28	Dúrcal,Central	890	R5	P y T	59	deAlcontar	1600	R2	P
29	Guadix,Instituto	905	R3	T	60	Arquilla	1652	R5	T
30	Técnico	915	R3	P	61	Soportújar,Casa	1700	R5	P
31	Guadix, C. deA.	916	R5	P	62	Forestal	1700	R5	P
	Cadiar	916	R5	P	63	Dúrcal, Presa	1800	R5	P y T
	Láujar	921	R2	P y T	64	Láujar,Cerecillo	1800	R2	T

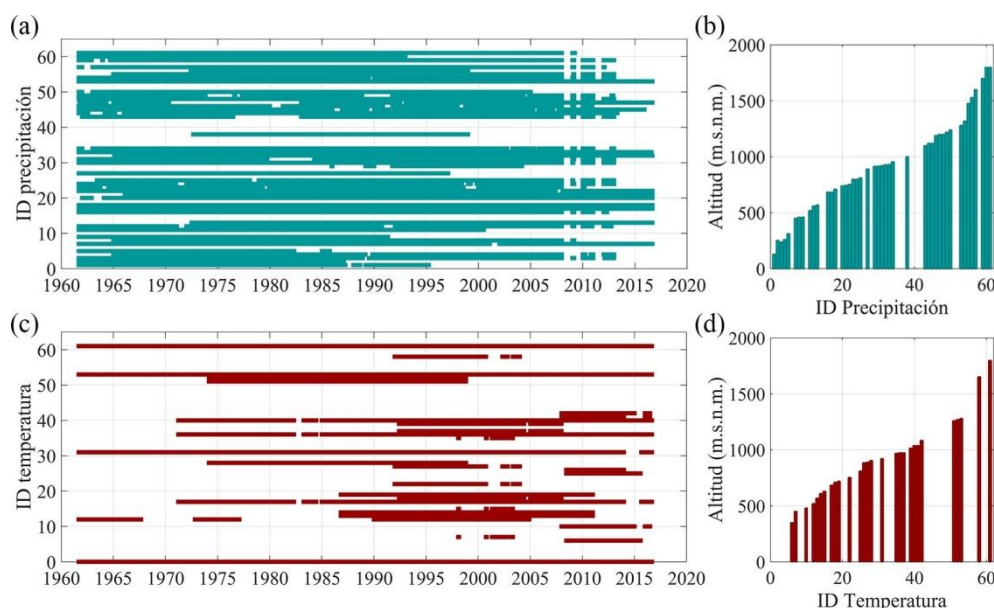


Figura iv Disponibilidad de datos meteorológicos: a) Diagrama de Gantt para las estaciones de precipitación seleccionadas; b) Perfil altitudinal de la ubicación de las estaciones de precipitación seleccionadas; c) Diagrama de Gantt para las estaciones de temperatura seleccionadas; b) Perfil altitudinal de la ubicación de las estaciones de temperatura seleccionadas.

Información climática: proyecciones de clima futuro bajo escenarios de emisiones

En el marco del 5º Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (AR5-IPCC *5th Assessment Report Intergovernmental Panel for Climate Change*; IPCC, 2014) cuatro diferentes escenarios futuros fueron definidos en términos de emisiones antrópicas de gases de efecto invernadero (GEI) dependientes del tamaño de la población, la actividad económica, el estilo de vida, el uso de la energía, los patrones de uso del suelo, la tecnología y la política climática. En base a estos criterios se establecen unas trayectorias de concentración representativas en la atmósfera (RCP, *Representative Concentration Pathway*), que incluyen un escenario de mitigación estricto (RCP2.6), dos escenarios intermedios (RCP4.5 y RCP6.0) y un escenario con un nivel alto de emisión (RCP8.5). A su vez, cada uno de estos escenarios se traduce en proyecciones de variables atmosféricas mediante modelos globales de circulación (GCM) que se generan a una resolución espacial a escala atmosférica, las cuales deben de ser regionalizadas mediante un proceso de *downscaling*, adaptándose así a las características locales de esta menor escala (i.e, topografía y usos de suelo). Al igual que con los escenarios futuros, esta misma metodología se aplica sobre un periodo de referencia, en el que las emisiones son conocidas, con el objetivo de poder realizar comparaciones y cuantificar cambios.

En este estudio se ha utilizado el *downscaling* de las proyecciones de clima futuro generado y distribuido por la AEMET para series de datos de precipitación y temperatura en determinadas estaciones meteorológicas de su red de medida, tanto para el periodo futuro 2006-2100 como para el periodo de referencia 1961-2000 (Petisco y Martín, 2006).

La AEMET proporciona para cada estación 18 posibles proyecciones futuras de estas variables para el periodo 2006-2100, resultado de la combinación de dos distintos métodos de *downscaling* para los resultados generados por nueve diferentes modelos globales bajo los escenarios de emisiones definidos en el AR5-IPCC (IPCC, 2014). Dichos modelos globales son: GCM4 (VonSalzen *et al.*, 2013), MPI-ESM-LR (Giorgetta *et al.*, 2013), ECHO (Legutke *et al.*, 1999), GFDL (Griffies *et al.*, 2005; GFDL Team, 2004), GISS-AOM (Russell *et al.*, 1995),

GISS-ER (Schmidt *et al.*, 2006), INM-CM4 (Volodin *et al.*, 2010), MIR-GCM2-0 (Tokiota *et al.*, 1984) y MIR-GCM2-1 (Yukimoto *et al.*, 2001). Por su parte, los dos métodos de *downscaling* disponibles para cada conjunto de proyecciones de modelos globales son: 1) Análogos (Kalnay *et al.*, 1996; Petisco *et al.*, 2005; Petisco y Martín, 2006), basado en la obtención de análogos sinópticos del día estudiado, y 2) SDMS (*Statistical Downscaling Method*) (Narula y Wellington, 1997; Kilsby *et al.*, 1998; Wilby *et al.*, 2002; Brunet *et al.*, 2008), basado en el establecimiento de regresiones lineales entre escala regional y escala local; ambos métodos pertenecen al grupo de técnicas de *downscaling* estadístico, basado en la búsqueda de relaciones empíricas entre las variables simuladas y las variables de interés en la zona de estudio, frente al grupo de técnicas de *downscaling* dinámico, basado en el aumento de resolución de los modelos aplicados.

En el área de estudio, la AEMET proporciona estas proyecciones de clima futuro en las 44 estaciones de precipitación seleccionadas para este trabajo. Sin embargo, solo en 4 de las 28 estaciones de temperatura del conjunto seleccionado para este trabajo se dispone de esta información; estas cuatro estaciones se ubican en las regiones R5 (Guadalejo), a cotas de 450 y 750 m s.n.m. (Tabla 2, ID: 6 y 21), y R2 (Andarax), a 1280 y 1800 m s.n.m. (Tabla 2, ID: 53 y 61).

Modelado distribuido de la dinámica de la nieve en Sierra Nevada

El análisis de la ocurrencia de precipitación en forma de nieve y de su evolución temporal en el área de estudio se ha realizado utilizando el modelo SNOWMED, un modelo de base física que resuelve las ecuaciones acopladas del balance de energía y masa de agua en la columna de nieve y las extiende de forma distribuida utilizando el modelo digital de elevaciones en la zona de aplicación. SNOWMED constituye el módulo de nieve en el modelo hidrológico WiMMed (*Watershed Integrated Model for Mediterranean Watersheds*; Polo *et al.*, 2009; www.uco.es/dhf/software/WiMMed), modelo hidrológico completamente distribuido de base física desarrollado para su aplicación en cuencas mediterráneas en general, caracterizadas por la semiaridez o la torrencialidad de las lluvias, con especial atención a las fuentes de variabilidad espacial, como son las cabeceras de montaña. El modelo se estructura en una serie de módulos dedicados a los diferentes volúmenes de control que usualmente se establecen a lo largo del ciclo hidrológico para establecer las ecuaciones de balance de agua y energía, y requiere series temporales de variables meteorológicas, así como información topográfica, edafológica y referente a la cubierta vegetal, junto con la caracterización de los cauces principales en la cuenca, para realizar la simulación hidrológica del periodo bajo estudio. SNOWMED se implementa de forma distribuida sobre la representación matricial del territorio y su cota dada por el modelo digital de elevaciones (MDE) de partida, requiere como variables de entrada la interpolación espacial de variables meteorológicas y proporciona la evolución temporal en la zona de estudio de diversas variables de estado de la capa de nieve junto con los flujos de agua y energía desde la misma, tanto de forma distribuida con la resolución espacial inicialmente proporcionada por el MDE, como semidistribuida o global mediante el promedio espacial de los resultados originalmente calculados.

SNOWMED ha sido calibrado y validado en la zona de estudio en el desarrollo de proyectos competitivos y cuenta con una versión operativa en tiempo cuasi-real para el seguimiento de la nieve en Sierra Nevada desarrollada en el marco del proyecto CGL2014-58508R financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad - MINECO (<http://www.uco.es/dhf/snowmed/>). A continuación, se describen brevemente sus principales aspectos a efectos de los cálculos

efectuados para este estudio; para un mayor nivel de detalle se pueden consultar las referencias aportadas a lo largo de estos apartados.

Interpolación de las variables meteorológicas

La interpolación espacial de las variables meteorológicas de entrada en SNOWMED se realiza mediante el módulo MeteoMap (Aguilar *et al.*, 2014) de WiMMed. Meteomap utiliza algoritmos de interpolación espacial específicos para cada una de las variables disponibles, que han sido verificados para condiciones de topografía abrupta. Estos algoritmos distribuyen la información meteorológica puntual observada en las estaciones a escala diaria (Herrero *et al.*, 2014) a lo largo del área de estudio incluyendo los efectos de la topografía de la zona (Aguilar *et al.*, 2010) a partir de los gradientes lineales locales estimados para cada variable frente a la elevación; este cálculo se realiza a diferentes escalas temporales dependiendo de la variable (i.e. escala de evento para la precipitación y escala global para la temperatura). La variable interpolada en cada celda del MDE de la zona de estudio es la suma de (Susong *et al.*, 1999; Garen *et al.*, 2005): a) el valor estimado utilizando el gradiente lineal topográfico calculado y b) el valor resultante de la interpolación espacial de los residuos asociados al cálculo con dicho gradiente en las estaciones meteorológicas que se utilizan como fuente de datos (esta interpolación se realiza utilizando el método de la distancia inversa al cuadrado a partir de las tres estaciones más cercanas, según Creutin y Obled, 1982, y Bytner *et al.*, 2006). Para la mejor calidad de los resultados es aconsejable una distribución homogénea de las estaciones meteorológicas. En este estudio, la interpolación se ha efectuado utilizando un MDE de 30 x 30 m (REDIAM, Junta de Andalucía).

Precipitación en forma de nieve

La ocurrencia de precipitación en forma de nieve se determina adoptando un umbral de temperatura, TSN, por debajo del cual toda la precipitación registrada durante un estado dado se considera nieve siguiendo la ecuación (1).

$$P_{nieve} = \begin{cases} P & \text{si } T \leq T_{SN} \\ 0 & \text{si } T > T_{SN} \end{cases} \quad (1)$$

En este estudio, se ha utilizado un umbral de TSN= 0 °C utilizando la temperatura media (Tmed) diaria en las series temporales de cada estación, considerando que toda la precipitación diaria es lluvia si Tmed>TSN o nieve en caso contrario.

Aunque la ocurrencia de nieve es un proceso complejo que depende de varias variables atmosféricas (Dai, 2008), así como de la densidad y el tamaño de las partículas de nieve (Lundquist *et al.*, 2008), cuya escala temporal es claramente inferior a la diaria, el conjunto de datos disponible no permitió utilizar un enfoque diferente, similar al abordado en otros trabajos (Klos *et al.*, 2014; Rajagopal *et al.*, 2016; Hatchett *et al.*, 2017). No obstante, esta aproximación ha sido ampliamente utilizada en numerosos trabajos (Motoyama y Motayama, 1990; Lynch-Stieglitz, 1994, Marks *et al.*, 2013), incluyendo aquellos en el área de estudio (Herrero *et al.*, 2009; Pimentel *et al.*, 2015), con resultados adecuados a escala diaria, especialmente para aplicaciones hidrológicas (Yang *et al.*, 1997).

Modelado de la dinámica de la capa nieve

El modelo de acumulación-ablación de nieve para ambientes mediterráneos desarrollado por Herrero *et al.* (2009) es un modelo físico basado en un balance de masa y energía a escala

puntual, que se amplía a escala distribuida por medio de curvas de agotamiento (Herrero *et al.*, 2011; Pimentel *et al.*, 2017).

El modelo puntual plantea el balance de energía y masa de agua sobre una columna vertical de nieve en una sola capa con área transversal unitaria, mediante el volumen de control definido por las columnas adyacentes de nieve en los laterales y por la atmósfera como límite superior y el suelo como un límite inferior. Las ecuaciones que determinan el balance son (ecuaciones 2 y 3):

$$\frac{dEA}{dt} = P - E - F + V \quad (2)$$

$$\frac{d(EA \cdot u)}{dt} = K + L + H + G + R \cdot u_R - E \cdot u_E + F \cdot u_F - V \cdot u_V \quad (3)$$

donde EA (equivalente de agua) es la masa de agua en la columna de nieve y u la energía interna por unidad de masa. En el balance de masa, los diferentes flujos de agua definidos son P (precipitación), E (evaporación/condensación), F (fusión) y V (advección debida al viento). Por otro lado, en el balance de energía, los diferentes flujos definidos son K (radiación de onda corta o radiación solar), L (radiación de onda larga), H (intercambio de calor sensible entre la superficie de nieve y la atmósfera), G (intercambio de calor sensible entre la base de la nieve y el suelo) y u_R , u_E , u_F , u_V (términos advectivos asociados a cada uno de los flujos de masa anteriormente definidos).

Esta aproximación permite una fácil extensión a un modelo distribuido mediante la realización de este balance acoplado celda a celda. El tamaño de celda empleado en el modelado es de 30 x 30 m, un tamaño que, por un lado, recoge la variabilidad del proceso representado (Blöschl, 1999) y del otro permite la calibración y validación gracias a la información de imágenes satélite Landsat TM, ETM+ y OLI. Sin embargo, esta extensión no puede realizarse de manera directa cuando el área de la celda no está completamente cubierta por la nieve. En estos casos, los efectos de escala se incorporan parametrizando los procesos que tienen lugar a una escala inferior a la de la celda mediante las denominadas curvas de agotamiento; son relaciones empíricas entre la fracción de cubierta de nieve en un área determinada y alguna de las variables de estado de la nieve en la misma extensión (Luce y Tarbotón 2004; Pimentel *et al.*, 2015). En SNOWMED, las curvas de agotamiento relacionan la fracción de cubierta de nieve en una celda dada y la altura media de la nieve en la misma, con diferentes formulaciones que se eligen en función de las características de la capa de nieve y la época del año para incorporar el efecto de diferentes ciclos secuenciales de acumulación/ablación a lo largo del periodo de nieve y a su amplia variabilidad (Herrero *et al.*, 2011; Pimentel *et al.*, 2017a).

El modelo puntual ha sido calibrado y validado en Sierra Nevada a partir de medidas *in situ* de diversas propiedades de la capa de nieve en diferentes campañas (Herrero *et al.*, 2009; Herrero y Polo, 2016). Las curvas de agotamiento a escala de celda fueron definidas, calibradas y validadas gracias a la información obtenida de fotografía terrestre de detalle en un área piloto (Pimentel *et al.*, 2017a) y la distribución en planta de la nieve fue calibrada y validada gracias a información de superficie cubierta de nieve obtenida de información de Landsat TM y ETM+ (Herrero *et al.*, 2011; Pimentel *et al.*, 2017b). Asimismo, la distribución espacial los flujos de fusión y evaporación neta se validaron de manera indirecta mediante correlaciones con la distribución espacial de la fracción de cobertura vegetal en la zona a partir de imágenes satélite (Gómez-Giraldez *et al.*, 2014).

Objetivos y estructura de la tesis

Objetivos

El objetivo global de esta tesis es evaluar el impacto de las tendencias climáticas sobre el régimen de la capa de nieve en Sierra Nevada como zona representativa de alta montaña mediterránea a diferentes escalas temporales y espaciales, tanto para el periodo histórico de observaciones disponibles como para escenarios de clima futuro. Para lograr este objetivo global se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Analizar la tendencia del régimen de precipitación en forma de nieve a diferentes escalas temporales durante el periodo histórico disponible.
- Evaluar las condiciones medias de torrencialidad y aridez del régimen de precipitación en forma de nieve en cuanto a su evolución, tendencias y escalas características.
- Analizar el impacto de las tendencias climáticas obtenidas durante el periodo histórico en la dinámica de la capa de nieve, en particular, sobre el reparto entre fusión/sublimación.
- Estimar el impacto de las proyecciones futuras del clima bajo los escenarios de emisiones disponibles sobre la dinámica de nieve en el área de estudio.

Las conclusiones alcanzadas junto con el conjunto de resultados generados constituyen una relevante base de información rigurosa para evaluar los impactos hidrológicos y de gestión de recursos hídricos, y otros derivados, del calentamiento global en estas zonas y generar las bases de estrategias y planes de adaptación.

Estructura de la tesis

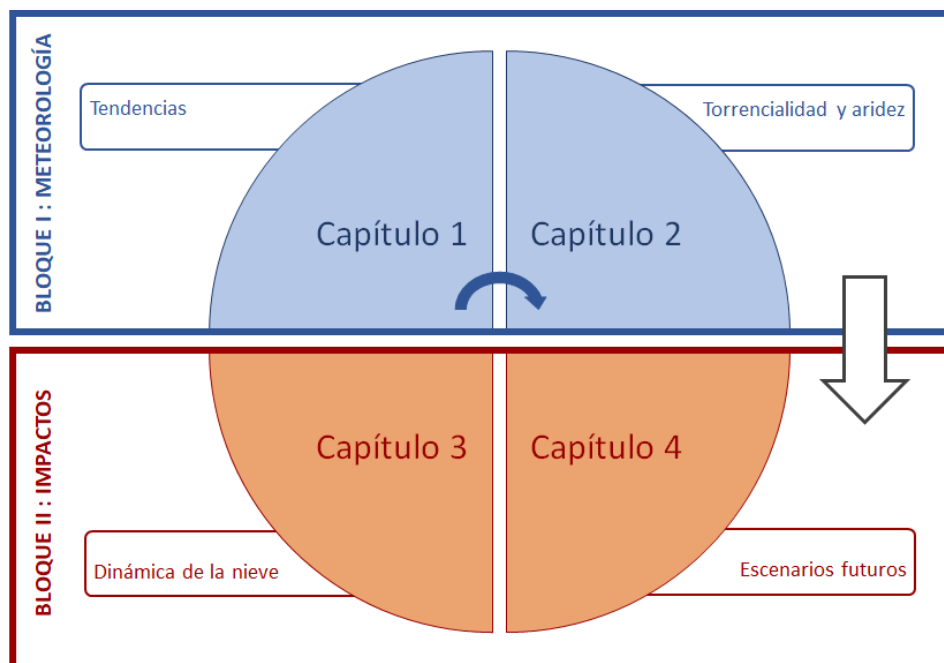


Figura v Representación esquemática de los contenidos y la estructura del trabajo de tesis doctoral.

La tesis doctoral se divide en cuatro capítulos, cada uno de los cuales es dedicado a cada uno de los objetivos específicos propuestos, agrupados en dos bloques según muestra la Figura v. Previamente, se ha introducido el contexto general del trabajo y se han descrito los aspectos

relevantes de la zona de estudio así como los datos disponibles para el estudio y las herramientas de modelado que se han utilizado en los diferentes pasos del análisis.

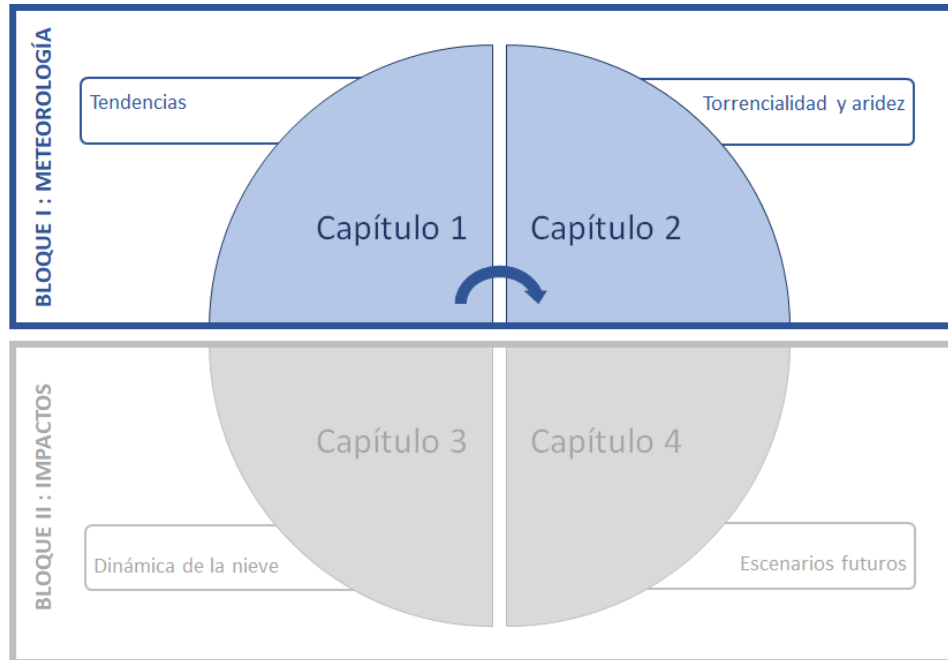
El Bloque I se dedica al análisis de tendencias del régimen de precipitación en forma de nieve durante el periodo 1961-2015 consta de dos capítulos. El primero, Capítulo 1, presenta el análisis de tendencias de los regímenes decenal y anual de precipitación y temperatura tanto de las observaciones en las estaciones meteorológicas seleccionadas, como de forma distribuida a partir de la interpolación espacial de las series temporales observadas, para estudiar la tendencia del régimen de precipitación en forma de nieve a dichas escalas temporales utilizando el algoritmo basado en umbral de temperatura; los resultados se muestran asimismo a escala puntual (estaciones meteorológicas) como distribuido. Estos resultados se utilizan en el Capítulo 2 para evaluar las condiciones medias de torrencialidad y aridez de la precipitación en forma de nieve a lo largo de Sierra Nevada durante el periodo de estudio; para ello, se utilizan índices seleccionados y se comparan los resultados con los correspondientes al régimen de precipitación. Entre otras, además de identificar y caracterizar las tendencias relevantes en el régimen de precipitación de la nieve, las conclusiones de este Bloque I permiten zonificar Sierra Nevada según las condiciones dominantes de aridez referidas a la nieve.

El segundo bloque de la tesis (Bloque II) utiliza los resultados generados en el bloque previo para evaluar su impacto sobre el balance de agua y energía en la capa de nieve y sobre el régimen de nieve asociado a escenarios de clima futuro local. Consta asimismo de dos capítulos. En el primero, Capítulo 3, se analizan los impactos de las tendencias “observadas” en la dinámica de nieve para el periodo con observaciones disponibles (1961-2015); para ello, se han realizado simulaciones del balance de agua y energía mediante el modelo físico validado en la zona SNOWMED y se han generado series anuales y decenales de fusión y sublimación desde la capa de nieve a lo largo de Sierra Nevada. Además de las tendencias asociadas a dichas variables de forma distribuida se han analizado las regiones delimitadas en la zona de estudio en función de la distribución de ambas componentes de la dinámica de la nieve. Por último, en el Capítulo 4 se evalúan los impactos en el periodo futuro (2006-2100) sobre la dinámica de la nieve bajo dos escenarios de emisiones seleccionados del quinto informe del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (AR5 - IPCC), a partir de las proyecciones futuras del régimen de precipitación en forma de nieve y sus descriptores, y el análisis de las correspondientes a los flujos de fusión y sublimación simulados en las regiones significativas identificadas en el Bloque I.

A las conclusiones derivadas de ambos bloques se añaden unas conclusiones globales junto con la estrategia futura de continuación de esta línea de trabajo. La profusión de series de datos generadas durante el proceso de análisis ha generado algunos anejos finales. Algunos aspectos metodológicos han sido recogidos también en uno de los anejos.

BLOQUE I : Análisis de tendencias del régimen de precipitación en forma de nieve en Sierra Nevada

El primer bloque de la tesis se dedica al estudio de la evolución del régimen meteorológico, en el área de Sierra Nevada, durante el periodo histórico con datos disponibles. El bloque se divide en dos capítulos. El primero, Capítulo 1 presenta el análisis de tendencias los regímenes de precipitación, temperatura y precipitación en forma de nieve, a varias escalas temporales (década, año, mes) y espaciales (puntual, distribuida). En el segundo, Capítulo 2, se analiza la torrencialidad y aridez de estos regímenes de precipitación y precipitación en forma de nieve.



CAPÍTULO 1: Análisis del régimen de precipitación en forma de nieve en el área de Sierra Nevada a distintas escalas espaciotemporales

1.1 Introducción

El impacto de la variabilidad climática en el régimen hidrológico es más evidente en las zonas de alta montaña debido a su carácter extremo (Beniston, 2003; IPCC, 2007). En las regiones semiáridas, como son las influenciadas por el clima mediterráneo, este cambio implica efectos significativos en el régimen fluvial y la disponibilidad de los recursos hídricos de manera directa, y una afectación en la biodiversidad de las zonas de manera indirecta. Es por ello, que el estudio de la cantidad de precipitación en forma de nieve y por tanto el conocimiento del régimen meteorológico es de gran relevancia para mejorar a largo plazo el funcionamiento de los recursos hídricos y su conservación en el entorno de dichas zonas.

La ocurrencia de precipitación en forma de nieve, principal condicionante del régimen de nieve, es un proceso termodinámico complejo, en el que distintas variables meteorológicas juegan un papel fundamental (i.e. precipitación, temperatura, humedad relativa, radiación, presión de vapor) (Dai, 2008). Sin embargo, los regímenes de precipitación y temperatura y sus interrelaciones son los principales condicionantes, de forma que son numerosos los estudios que estiman la precipitación en forma de nieve exclusivamente con relación entre ambos regímenes trabajos (Motoyama y Motayama, 1990; Lynch-Stieglitz, 1994, Marks *et al.*, 2013), dado que precipitación y temperatura son las variables comúnmente observadas en el mayor número de estaciones meteorológicas y, por tanto, constituye en numerosas ocasiones la única información disponible para estimar la ocurrencia de precipitación en forma de nieve. Es por tanto crucial disponer de una amplia red de monitorización que permita por un lado una cobertura espacial suficiente para cubrir las variaciones locales debidas a efectos orográficos, y por otro que disponga de un largo registro de datos. No obstante, el monitoreo de las variables meteorológicas constituye un trabajo arduo, especialmente en zonas de montaña. La limitada accesibilidad de algunas zonas durante la temporada de nieve, y las duras condiciones de trabajo para la instrumentación, complican la obtención de sistemas de monitoreo continuo. Además, en este tipo de zonas donde existe una gran variabilidad en el clima, largas series temporales de datos son necesarias para poder realizar un análisis concluyente (Yang *et al.*, 1997).

Es claro, por tanto, que el análisis de las variables meteorológicas a largo plazo constituye la base para el estudio de la dinámica de la nieve (i.e. tendencias, regímenes medios, extremos): como primer paso para comprender su comportamiento en décadas futuras.

En este contexto el objetivo de este capítulo es analizar los patrones observados en los regímenes meteorológicos de precipitación y temperatura así como en el de precipitación en forma de nieve; haciendo especial hincapié en el estudio de las tendencias observadas, en las cuencas de cabecera de Sierra Nevada, para el periodo histórico (1961-2015) a diferentes escalas espacio-temporales.

1.2 Metodología

En el análisis de la información meteorológica disponible se realiza una evaluación de los regímenes de precipitación y temperatura, así como del régimen de precipitación en forma de nieve derivado de la interacción entre los dos anteriores. Se calculan, además, tres variables asociadas a los mismos con el fin de analizar la ocurrencia, persistencia, y evolución de los eventos de precipitación y nieve. El análisis se realiza a dos escalas espaciales: puntual, información directamente observada en las estaciones; y, distribuida, valores interpolados en toda el área de estudio; y a tres escalas temporales: mensual, anual y decenal. Los datos utilizados son los observados en las estaciones seleccionadas (ver sección *Red de monitorización y datos meteorológicos*) durante el período 1961-2015. 8 son las variables definidas:

- **Precipitación anual/mensual (P)**, definida como la suma de la precipitación diaria a la escala de estudio, año/mes.
- **Temperatura media (Tmed)**, definida como el promedio anual/mensual de la temperatura media diaria.
- **Temperatura máxima (Tmax)**, definida como el promedio anual/mensual de la temperatura máxima diaria.
- **Temperatura mínima (Tmin)**, definida como el promedio anual/mensual de la temperatura mínima diaria.
- **Precipitación en forma de nieve anual/mensual (Pn)**, definida como la suma de la precipitación diaria de nieve (a escala de estudio, año/mes), calculada mediante el método TSN (ver sección *Análisis de la precipitación en forma de nieve*).
- **Días al año/mes con precipitación (Dpre)**, Definido como el número de días al año/mes en el que la precipitación diaria es superior a 0.1 mm.
- **Días al año/mes con temperatura umbral (DTmin)**, Número de días al año/mes en el que la temperatura mínima diaria es igual o inferior a 0 °C.
- **Días al año/mes con precipitación en forma de nieve (Dpn)**, definido como el número de días al año en el que la precipitación de nieve obtenida mediante el uso de la temperatura mínima diaria es superior a 0.1 mm.

En el caso del análisis a escala de década se muestran las distribuciones de los valores anuales correspondientes a cada década analizada, no valores promediados a esta escala.

1.2.1 Interpolación espacial de la información meteorológica

La interpolación espacial para el análisis distribuido de precipitación y temperatura a escala diaria se ha realizado mediante el módulo de interpolación, MeteoMap (Herrero *et al.*, 2010; Aguilar *et al.*, 2014) del modelo hidrológico WiMMed, el cual utiliza algoritmos de interpolación espacial testados en la zona y específicos para cada una de las variables disponibles, para este estudio precipitación y temperatura (ver sección *Interpolación de las variables meteorológicas*).

1.2.2 Ocurrencia de precipitación en forma de nieve

La ocurrencia de precipitación en forma de nieve se determinó a escala diaria a partir del método TSN (ver sección *Análisis de la precipitación en forma de nieve*).

Debido a la no disponibilidad de datos históricos observados de precipitación en forma de nieve, para cuantificar el posible error cometido al considerar un valor diario de la temperatura como representativo, se comparan los valores de precipitación en forma de nieve obtenidos utilizando como TSN las temperaturas mínima, media y máxima diaria, con los valores de precipitación en forma de nieve obtenidos realizando el cálculo a escala horaria. Dada la no disponibilidad de datos horarios en las estaciones seleccionadas en el estudio a largo plazo, se selecciona la estación PG2 localizada a 2500 m s.n.m y con datos de alta frecuencia disponibles desde 2004 (Figura iii).

En el caso del análisis de la precipitación en forma de nieve distribuida, su cálculo se realiza utilizando la misma metodología. Es decir, precipitación y temperatura media son interpoladas diariamente sobre toda el área de estudio, aplicando sobre estos valores distribuidos cada elemento de la malla, la TSN correspondiente.

1.2.3 Análisis de datos a largo plazo: estadísticas y tendencias

La evolución temporal y los estadísticos principales son calculados para cada una de las variables descritas para cada una de las escalas espaciotemporales. La detección de tendencias estadísticas se realiza mediante el test de Mann-Kendall (Anejo A, Gibbons y Chakraborti, 2010). La prueba asume como hipótesis nula: tendencia no monótona (H_0), y como hipótesis alternativa: presencia de una tendencia monótona (H_1). Se utiliza un nivel de significancia $\alpha > 0,1$ para definir la región de rechazo. En este trabajo, se considera que existe tendencia siempre que la significancia estadística siempre que la confianza sea mayor del 90%; se hablará en todo caso valores inferiores de confianza.

1.3 Resultados

Este apartado muestra la evolución del régimen meteorológico, precipitación, temperatura, y su derivada precipitación en forma de nieve para el periodo de estudio (1961-2015). Cada uno de los tres análisis han sido realizados a escala espacial puntual (en cada una de las estaciones meteorológicas disponibles) y a escala espacial distribuida. Además, las escalas temporales, de década, año y mes han sido analizadas con objeto de conocer la evolución en cada una de ellas.

1.3.1 Análisis de tendencias del régimen de precipitación

1.3.1.1 Análisis puntual

Este apartado muestra la evolución del régimen de precipitación para los datos diarios de un total de 44 estaciones de precipitación instaladas en la zona (Figura ii) a diversas escalas temporales. El análisis se realiza teniendo en cuenta la región en la que se encuentran ubicadas cada una de las estaciones meteorológicas (diferentes colores en la figura) así como la localización de las mismas (menor a mayor cota, de izquierda a derecha y de arriba a abajo; la numeración (ID) de las estaciones se corresponden con valores crecientes de cota).

Evolución a escala de década

La Figura 1.1, muestra para cada una de las estaciones analizadas la evolución en la precipitación a escala de decenal en el periodo de estudio. La variabilidad entre estaciones, regiones y cotas queda reflejada. De manera regional, se presentan las estaciones ubicadas en la R5 (Guadalfeo) como las más húmedas de todas las analizadas, seguidas por las de las regiones

R1 y R4 (Adra y Genil, respectivamente), las cuales no son fácilmente clasificables entre ellas en este régimen de humedad. Las regiones de Andarax y Fardes (R2 y R3) muestran un régimen más seco que las anteriores.

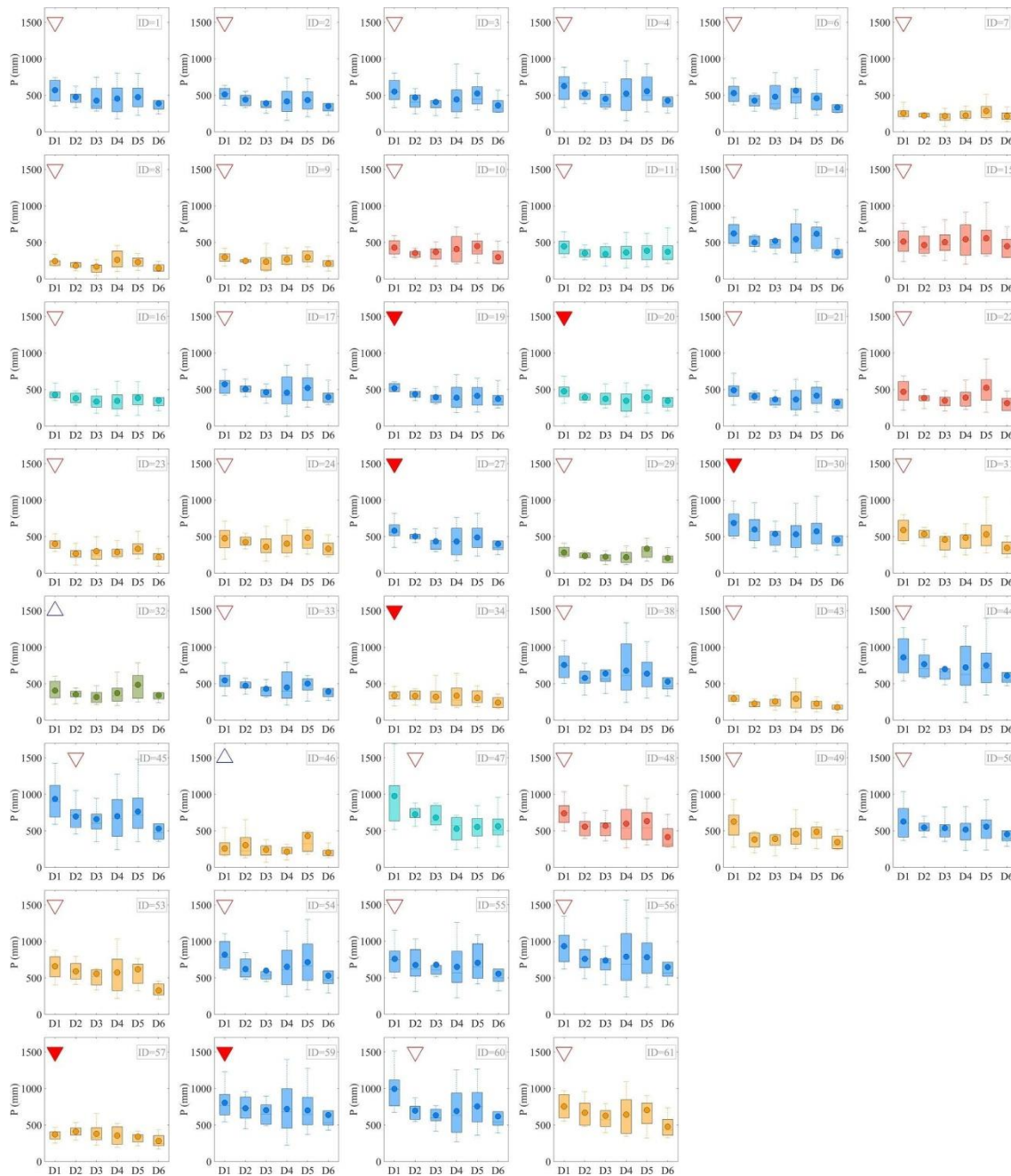


Figura 1.1 Precipitación anual por décadas en las estaciones meteorológicas ubicadas en las diferentes regiones (R1: rojo; R2: naranja; R3: verde oliva; R4: turquesa; R5: azul). Evolución obtenida en cada una de las estaciones: triángulo rojo: evolución decreciente; triángulo azul: evolución creciente. (Triángulo relleno, tendencia estadística con significancia $\alpha = 0.1$).

De las 44 estaciones meteorológicas un total de 42 presentaron una evolución decreciente de la precipitación en anual media a escala de década, si bien sólo un 16%, que se identifican en la figura, arrojaron una tendencia decreciente (con un nivel de confianza del 90%). Las dos estaciones que presentaron una evolución creciente en la precipitación se encuentran localizadas en la cara norte de la sierra; en las regiones que muestran un régimen anual más seco, no obstante, no se ha encontrado tendencia al nivel de confianza seleccionado.

Al analizar las décadas, destaca la D4 (1990-1999), como la década más variable para la mayoría de las estaciones analizadas, seguida de la D5 (2000-2009). Dicha variabilidad es más acentuada en la R5 (Guadalfeo) y es más visible para las estaciones ubicadas en cotas superiores a los 1000 m s.n.m.

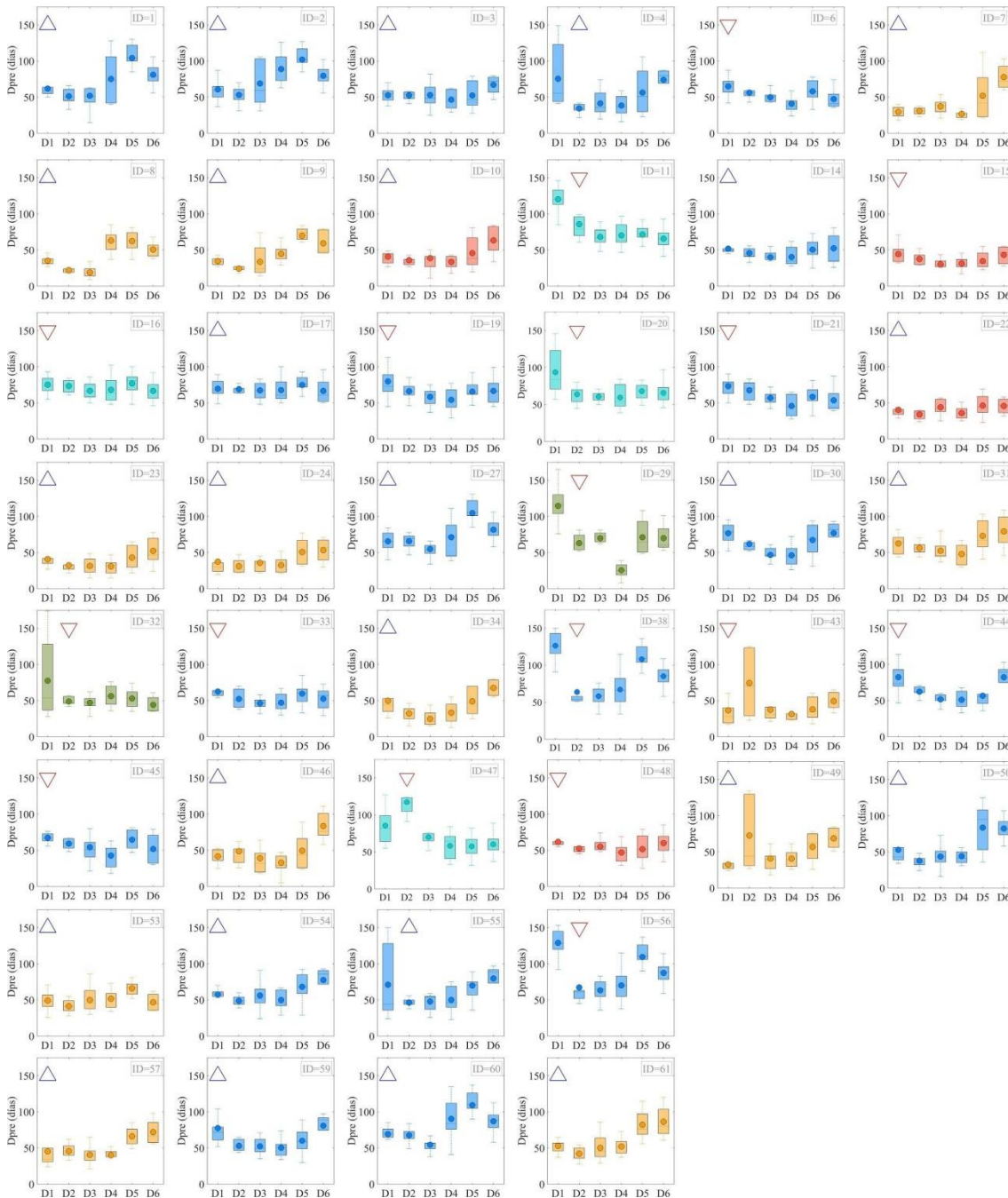


Figura 1.2 Días de precipitación al año por décadas en las estaciones meteorológicas ubicadas en las diferentes regiones (R1: rojo; R2: naranja; R3: verde oliva; R4: turquesa; R5: azul). Evolución obtenida en cada una de las estaciones: triángulo rojo: evolución decreciente; triángulo azul: evolución creciente. (Triángulo relleno, tendencia estadística con significancia $\alpha = 0.1$).

Derivado de los datos de precipitación diaria observada en las estaciones meteorológicas, la Figura 1.2 presenta la evolución por décadas de los días al año en los que la precipitación supera 1 mm de precipitación. El valor medio para todas las estaciones y en las 6 décadas analizadas es de 58 días de precipitación al año. No encontrando variabilidad entre los valores promedios realizados por regiones. Al realizar un análisis por cotas, asumiendo un ancho de cota de 500 m,

se obtiene valores muy similares para las estaciones ubicadas en cotas inferiores a los 1500 m s.n.m., con valores promedio de 56, 57 y 57 días para las estaciones ubicadas en cotas inferiores a los 500, 500-1000 y 1000-1500 m s.n.m., respectivamente. Sin embargo, para las 5 estaciones localizadas por encima de los 1500 m s.n.m., la media obtenida es de 68 días con precipitación, los cuales si se analizan de manera independiente para las dos regiones en las que hay datos se observan una media de 114 días de precipitación para la R5 (Guadalfeo) y 56 días de precipitación para la R2 (Andarax). Se pone de manifiesto por tanto una variabilidad en los regímenes de precipitación aproximadamente a la cota 1500 m s.n.m., que para el periodo analizado pueden suponer una diferencia que alcance el doble de días. La falta de estaciones con datos históricos por encima de los 1800 m s.n.m. imposibilita conocer la evolución de los días de precipitación al año y sus diferencias entre estaciones a cotas superiores, cotas en las que la presencia de nieve es clave.

Al analizar la evolución de las estaciones de precipitación disponibles, un total de 17 estaciones (38%) arrojan un decrecimiento de los días de precipitación frente a las 27 estaciones (62%) que muestran un aumento del número de días con precipitación al año. En un análisis regional de esta evolución R3 y R4 (Fardes y Genil, respectivamente) muestran para todas las estaciones analizadas una evolución decreciente. El resto de las regiones (R1, R2 y R5) arrojan un aumento y disminución de la variable a analizar en función de la estación analizada. Cabe destacar, cómo para ninguna de las estaciones analizadas, se observa tendencia con significancia estadística inferior a 0,1.

La evolución de DPre (Figura 1.2) por décadas no muestra correlación con los valores de Pre (Figura 1.1), es decir no existe una relación directa entre la magnitud de la precipitación y su distribución temporal a esta escala. No obstante, si se observa como R1 (Adra), es la región en la que se observa mayor homogeneidad entre décadas, seguida de R3 (Fardes). Por el contrario, las R2 y R5 (Andarax y Guadalfeo, respectivamente) muestran una alta variabilidad entre estaciones y décadas, siendo en la mayoría de las estaciones la D5 y D6 (corresponden a los años 2000-2016) las más variables. Para la región de Genil (R4) son las dos primeras décadas analizadas (D1 y D2) las que muestran más variabilidad.

Evolución a escala anual

La distribución a escala anual de la precipitación y los días de precipitación en cada una de las 44 estaciones analizadas se muestra en la figura 1.3.c. En término medio, la precipitación media observada por bandas de cota de 500 m s.n.m. varía desde 403.6mm para las estaciones ubicadas en cotas inferiores a los 500 m s.n.m. a 659.9 mm de precipitación anual para el caso de las 5 estaciones situadas en cotas entre los 1500-1800 m s.n.m. Al realizar las medias por bandas de cota pero además en cada una de las regiones, se observa como el gradiente altitudinal influyen en todas las regiones analizadas, obteniéndose mayor precipitación media en las cotas altas. Por otro lado, se observa cómo dichas medias varían entre regiones. De este modo, la R2 (Andarax) oscila entre 224.4mm y 512.7 mm para cotas inferiores a los 500 m s.n.m. y superiores a 1500 m s.n.m. y para el caso de R5 (Guadalfeo) varía entre 475.2 mm y 751.2 mm de media en las mismas bandas de cota. Estas dos regiones son las únicas en las que se tiene estaciones ubicadas en todas las bandas de cota analizadas.

Al analizar el valor medio de todas las estaciones para cada una de las regiones, se obtiene como la más húmeda la R5 (Guadalfeo) con un valor medio de 573.3 mm de precipitación anual para los 55 años analizados y las 21 estaciones ubicadas en esta región. Le siguen la región R1 (Adra) con 478.7 mm y la R4 (Genil) con 455.1 mm. Por el contrario, en término medio se

situaría como la más seca la región R3 (Fardes) con 318.9 mm seguida de la R2 (Andarax) con 373.5mm. No obstante, no se debe obviar que estas la representatividad de la región R3 (Fardes) con solo 2 estaciones y en banda de cotas muy similares (Tabla ii) es inferior al resto de regiones. De manera visual, figura 1.3.a. muestra que la R5 (Guadalfeo) es la más húmeda y la R2 (Andarax) la más seca.

En relación con la evolución, la figura 1.3.c. muestra un mapa con la ubicación de las estaciones y su evolución anual. De las 44 estaciones meteorológicas analizadas, 37 mostraron una evolución decreciente de las cuales sólo en 20 se observó una tendencia significativa con un nivel de confianza de al menos el 90%. Las 7 estaciones que reflejan una evolución creciente en precipitación anual, no muestran tendencia estadística significativas en ninguno de los casos.

En relación a la localización, se observa como la zona oeste (todas las estaciones ubicadas en las regiones R4 y R5) aportan tendencias decrecientes, la mitad de ellas con significancia estadística ($\alpha=0.1$) y que se ubican en su mayoría (54% de las estaciones con significancia estadística) en el ancho de cota correspondiente entre los 500 m s.n.m. y los 1000 m s.n.m. Las regiones de Adra y Fardes (R1 y R3, respectivamente) muestran evoluciones crecientes. Por último, la región de Andarax (R2) muestra un total de 11 estaciones (84%) con evolución decreciente de las cuales 6 de ellas con significancia estadística ($\alpha=0.1$) y que se encuentran en cotas superiores a los 1000 m s.n.m.

La evolución de la variable derivada de la precipitación, Dpre, se representa en la Figura 1.3.b, c. Se observa una media de 57 días al año con precipitaciones superiores al 1mm. Valores que oscilan levemente entre las estaciones situadas en cotas inferiores a los 1500m s.n.m. (55 días para las estaciones situadas en cotas de menos de 500 m s.n.m. y 56 para las situadas en cotas entre los 1000m s.n.m. y los 1500m s.n.m.). Sin embargo, se observa un aumento de 10 días sobre el valor medio para las 5 estaciones ubicadas en cotas entre los 1500m s.n.m. y los 1800m s.n.m. Al igual que para la precipitación, un análisis regional y clasificado por bandas de cota se realizó. A escala regional en todas las altitudes en las que se tienen datos, la región con más días de precipitación fue la región de Genil (R4) con una media de 74.5 días al año de precipitación, seguida por Guadalfeo (R5) con 63.6 días. Por el contrario, la región con menos días de precipitación al año fue la región correspondiente a la cuenca del río Adra (R1) con una media de 43.1 días de precipitación al año, seguida por la región del Andarax (R2) con 46 días de media. No obstante, a la hora de analizar estos resultados, se debe de tener en cuenta que la distribución de estaciones no es igual en todas las regiones y que las medias son solo un valor estimado de la ocurrencia de días de precipitación. Además, valores medios por regiones fueron obtenidos por banda de 500mts de cota. En este sentido, nuevamente la región de Genil resultó ser la que cuenta con más días de precipitación al año. Para las regiones R2 y R5 (Andarax y Genil, respectivamente), las únicas que tienen estaciones en todas las banda de cota analizadas, una diferencia de 15 días fue observada desde las estaciones ubicadas en cotas inferiores respecto a las superiores (R2: 40 días de precipitación al año en estaciones ubicadas en cotas inferiores a los 500 m s.n.m., 54 días de precipitación al año en estaciones ubicadas en cotas superiores a 1500 m s.n.m.; R5: 61días de precipitación al año en estaciones ubicadas en cotas inferiores a los 500 m s.n.m., 75 días de precipitación al año en estaciones ubicadas en cotas superiores a 1500 m s.n.m.). Estos resultados de nuevo muestran el carácter árido de la R2 (Andarax) frente al húmedo de la R5(Guadalfeo). Además, la variabilidad de los datos observados en la región R5 (Guadalfeo) es observada en la Figura 1.3.bpara todas las bandas de cota analizadas.

Las tendencias fueron analizadas para cada una de las estaciones seleccionadas para la variable derivada de la precipitación, días al año con precipitación superior a 1mm (Figura 1.3.c). Un 54% (24 estaciones) de las estaciones analizadas presentó un aumento del número de días con precipitación al año, de las cuales 17 situadas en la región R2 y R5 arrojaron una tendencia estadísticamente significativa (nivel de confianza 90%). De las 20 estaciones meteorológicas con datos de precipitación que mostraron una evolución decreciente, solo un 35% arrojaron significancia estadística. Cabe destacar que la R3 y R4 (Fardes y Genil) se observaron evolución decreciente no significativa para esta variable en todas sus estaciones.

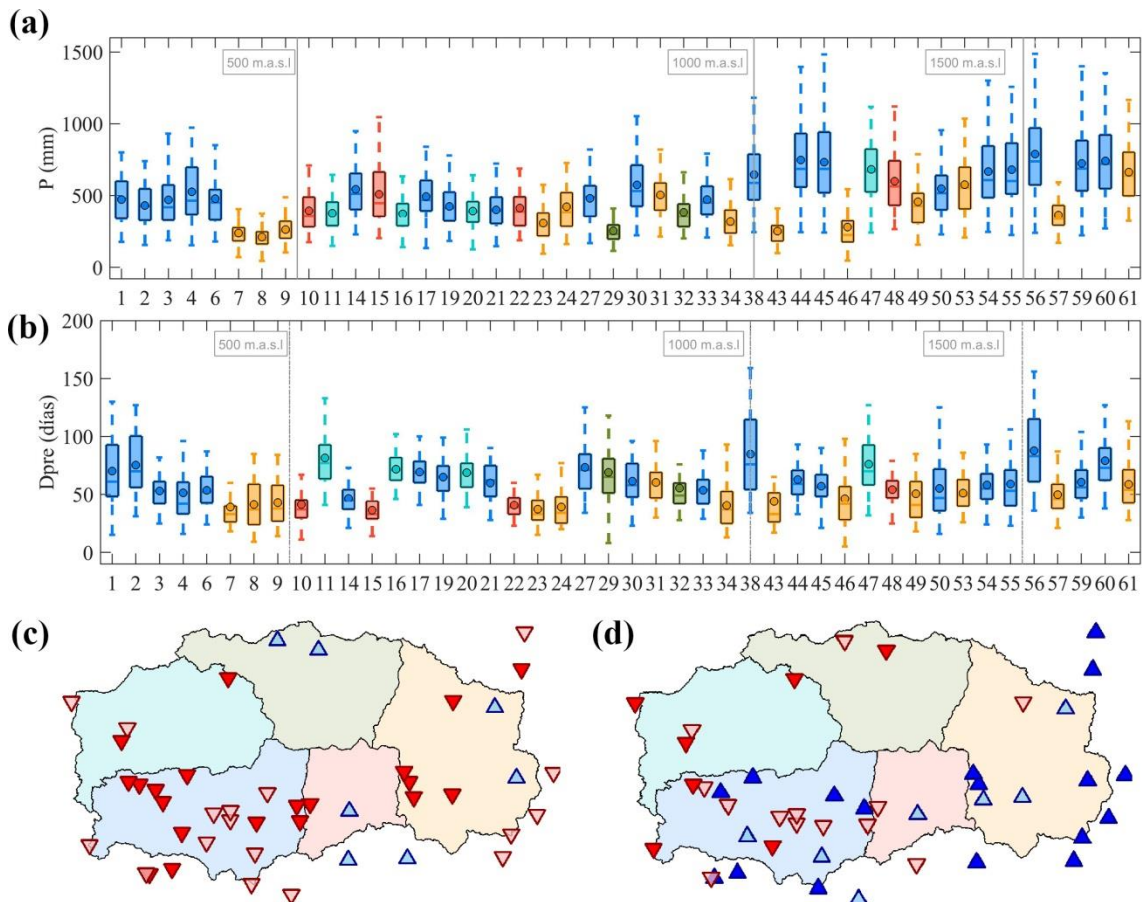


Figura 1.3 Distribución de la precipitación anual (a) y los días de precipitación al año (b) en las estaciones analizadas en las diferentes regiones (R1: rojo; R2: naranja; R3: verde oliva; R4: turquesa; R5: azul). Mapa de evolución de las estaciones meteorológicas con datos de precipitación anual (c) y la variable derivada Dpre (d): Triángulo rojo: evolución decreciente; Triángulo azul: evolución creciente. En ambos casos, la intensidad del color refleja las estaciones con tendencia significativa con un nivel de confianza $\alpha = 0,1$.

Evolución a escala mensual

Por último a escala puntual se analizaron las variables obtenidas de las estaciones de precipitación a escala mensual. La Figura 1.4 muestra para cada una de las 44 estaciones la evolución de los 55 años analizados para cada uno de los meses del año. En primer lugar, se observa como la variabilidad entre estaciones es superior cuan superior es la cota en la que se localizan. Además, se observa a la perfección como los meses de verano son los más secos y como se cumple el aumento y disminución de precipitación a lo largo del año hidrológico. Al analizar en profundidad, y a escala global, regional y por bandas de cota se concluye que el mes más húmedo corresponde con el mes de diciembre y por el contrario el más seco con el de julio. Sin olvidar que la distribución por regiones no es homogénea, en un análisis regional, se

observa como la R5 (Guadalfeo) es la que presenta valores más altos en todos los meses del año a excepción de los meses de julio y agosto, en la que la región de Fardes (R3) es la más húmeda.

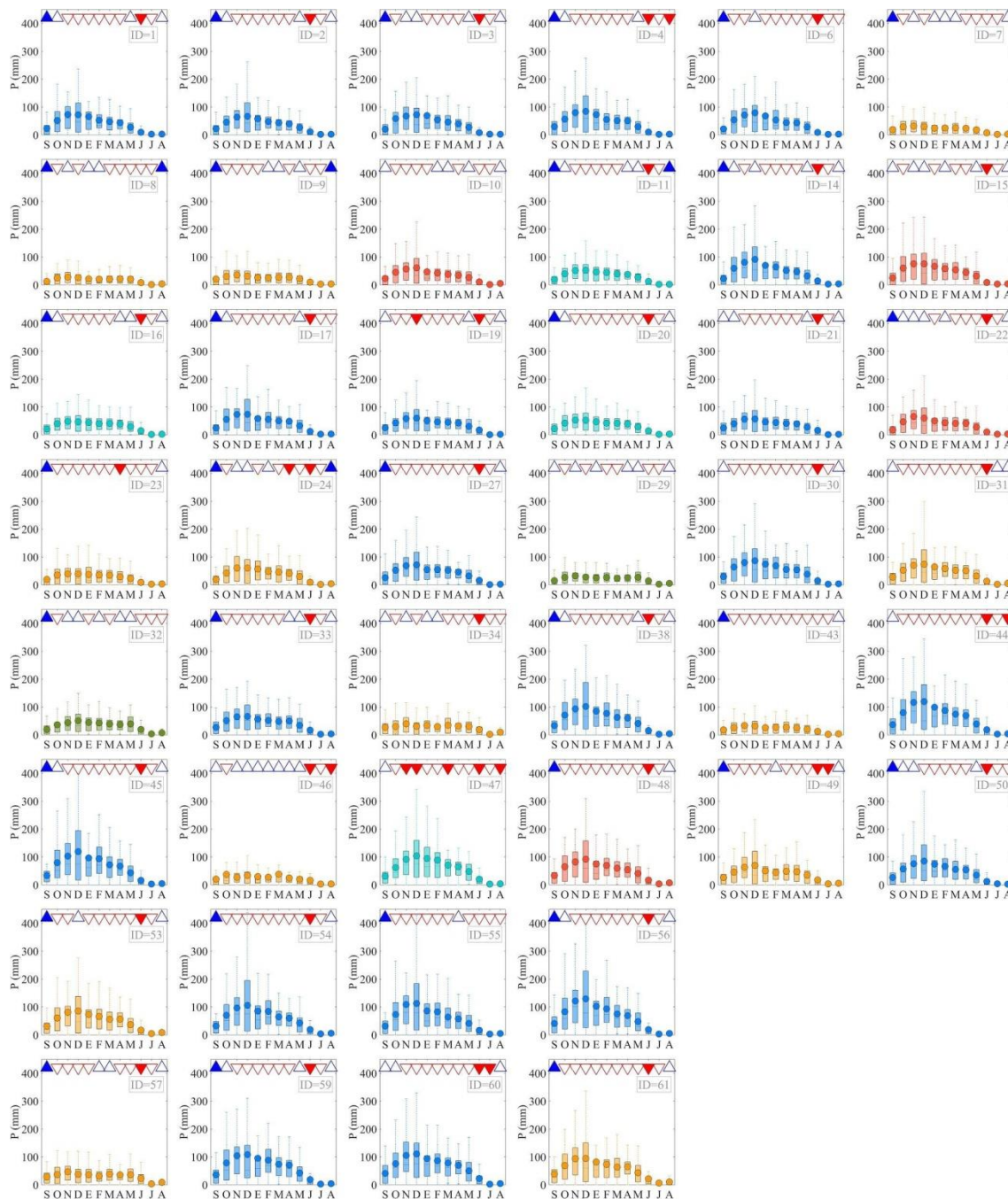


Figura 1.4 Distribución de la precipitación mensual para en las estaciones meteorológicas con datos de precipitación en las diferentes regiones (R1: rojo; R2: naranja; R3: verde oliva; R4: turquesa; R5: azul). Evolución obtenida en cada una de las estaciones: triángulo rojo: evolución negativa; triángulo azul: evolución positiva. (Triángulo relleno, tendencia estadística con significancia $\alpha = 0.1$).

Curiosamente esta última región (R3) es la región más seca para los meses comprendidos entre septiembre y abril, seguida de la R2 (Andarax). Siendo en los meses de veranos las regiones de Adra y Genil (R1 y R4) los que presentan menos valores de precipitación media mensual para todo el periodo analizado. En el análisis regional por bandas de cota, se concluye que la región R5 es que presenta un carácter más húmedo desde el inicio del año hidrológico (Septiembre) al mes de mayo. Siendo en los meses de verano, la región R2 (Andarax) la que supera en precipitación media al resto de regiones. De manera global, las diferencias entre regiones son

menos palpables en los meses secos que en los húmedos, en los que la diferencia de precipitación entre regiones puede variar hasta un 43% de la precipitación media mensual.

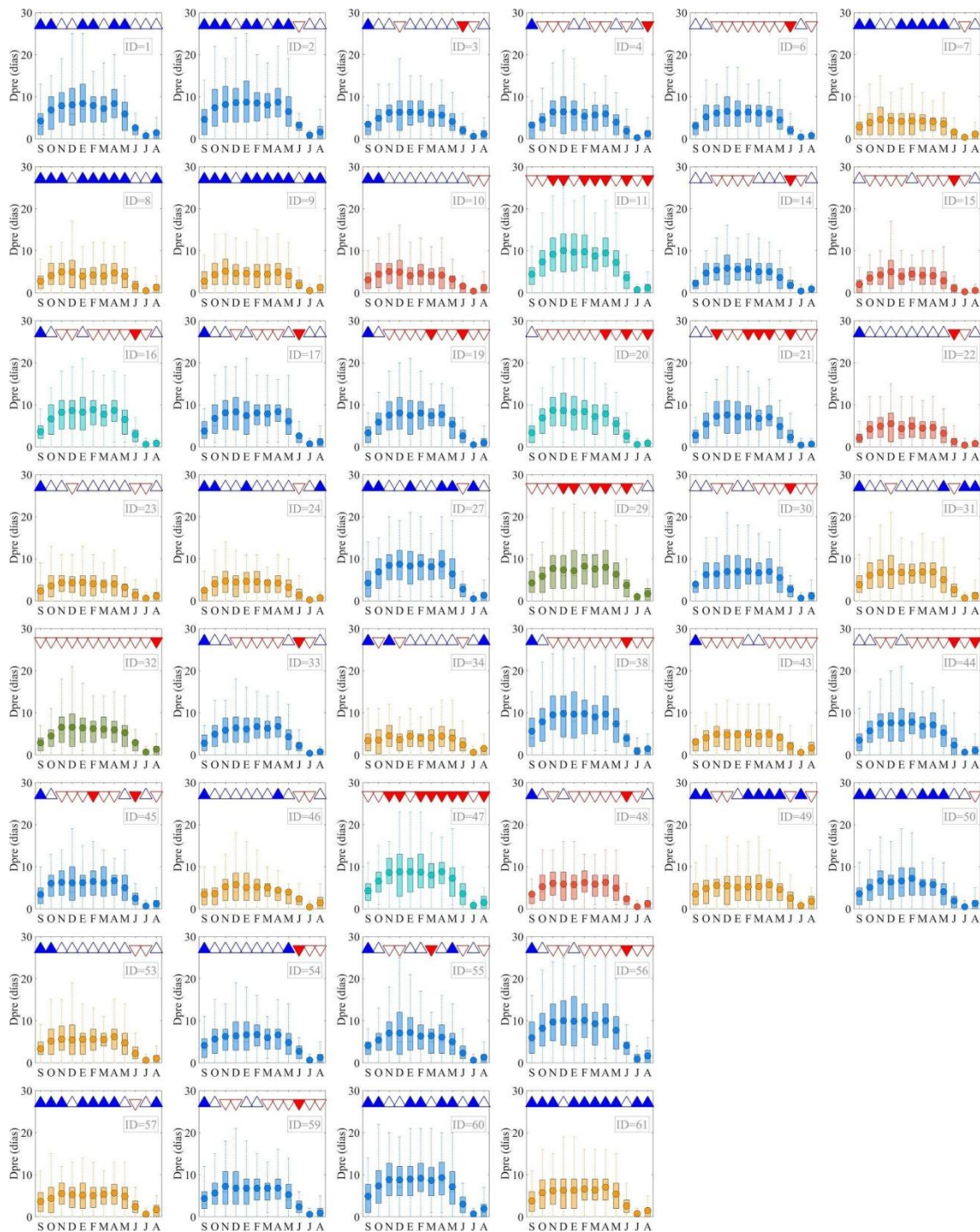


Figura 1.5 Distribución mensual de los días con precipitación para en las estaciones meteorológicas con datos de precipitación en las diferentes regiones (R1: rojo; R2: naranja; R3: verde oliva; R4: turquesa; R5: azul). Evolución obtenida en cada una de las estaciones: triángulo rojo: evolución negativa; triángulo azul: evolución positiva. (Triángulo relleno, tendencia estadística con significancia $\alpha = 0.1$).

En lo que a evolución se refiere, se observa de manera general un decrecimiento en la precipitación en todos los meses del año salvo en los meses de agosto y septiembre en los que se observa un aumento de la precipitación en todas las estaciones para el caso del mes de septiembre y en un 88% de las estaciones para el caso de agosto. Salvo para el mes de septiembre y el de junio, en general, no se obtuvo significancia estadística en las evoluciones.

1.3.1.2 Análisis distribuido

Los resultados obtenidos de los algoritmos de interpolación (ver sección 1.2.1) para el periodo de estudio comprendido entre los años 1961-2015 y el análisis del comportamiento del régimen de precipitaciones (P y Dpre) se muestran en este apartado a diversas escalas temporales que van desde una escala de década hasta finalmente un análisis mensual de dichas variables.

Evolución a escala de década

La Figura 1.6 representa el comportamiento distribuido promedio anual y los valores promedios para todo área de estudio para la precipitación y su variable asociada en ocurrencia, Dpre, por décadas para el periodo de referencia que está compuesto por 5 décadas completas y una última década compuesta por 6 años hidrológicos (2010-2015).

Para ambas variables, el análisis decenal muestra comportamientos muy dispares dependiendo de la década analizada. Los valores medios tienden a decrecer pero la distribución de la precipitación a lo largo de los 10 años que abarcan cada una de las décadas tienden a ser muy variables. A nivel global entre décadas, la D5 no apoya la evolución negativa que reflejaban las cuatro décadas anteriores. Esta década refleja valores extremos. La D6, aún sin terminar, vuelve a ser una década con valores decrecientes. En el caso del análisis espacial decenal promediado refleja una tendencia general a la disminución de la precipitación, y como las zonas de cumbres ubicadas por encima de los 2500 m s.n.m. son las que arrojan precipitaciones por encima de los 800 mm de precipitación en todas las décadas analizadas. Destaca para esta precipitación, la magnitud de la D1 en la zona de transición entre las cotas bajas y las cumbres y en la parte correspondiente a la zona del parque de Huétor situada en la Región de Genil (R4). Una clara zonificación es encontrada en estos mapas. En la cual, se observa un carácter húmedo en ocurrencia y magnitud para las R3, R4 y R5. Siendo las R1 y R2 las regiones que arrojan menor precipitación y a su vez menor número de días con precipitación. Estas regiones, además, presentan una tendencia de pérdida de Dpre menos severa que para el caso de las regiones clasificadas como húmedas.

Para el caso de la precipitación, se observa un carácter cíclico que abarca desde la D1 a la D3 y otro periodo que abarca las últimas 3 décadas. No obstante, este segundo periodo comprendido entre las D4 y la D6 se define como el más variante y extremo (mínimo y máximo) en términos de precipitación y temperatura.

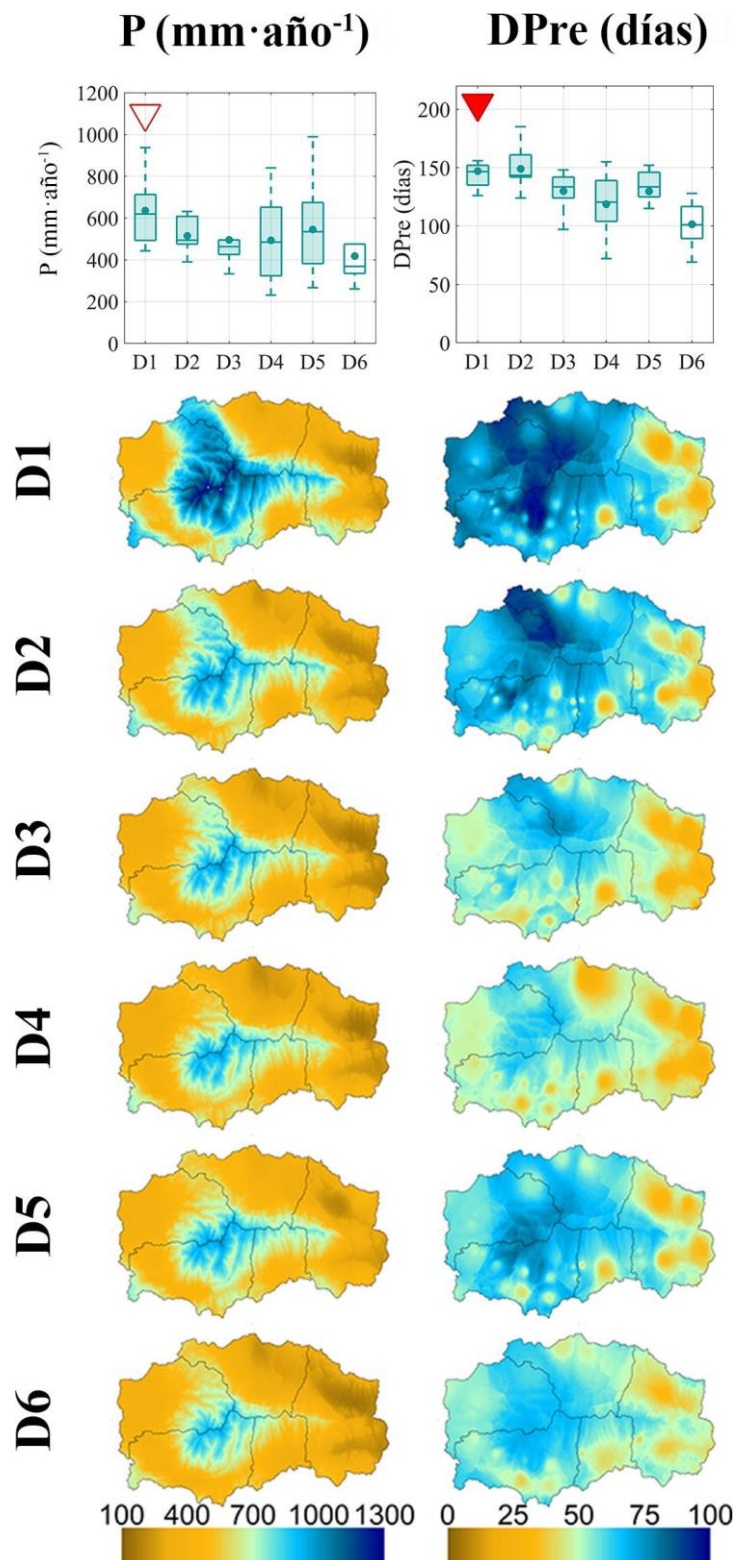


Figura 1.6 Valores distribuidos y promediados de las variables del régimen de precipitación analizadas a escala decenal en el periodo analizado comprendido entre 1961-2015.

Evolución a escala anual

La Figura 1.7.a representa los valores de precipitación anual promedio analizados para la zona de estudio. Con una media de 526.2 mm para todo el periodo, la tendencia muestra un decrecimiento de 2.348 mm de pérdida al año con una significancia de

$\alpha=0.1$. Los valores máximos y mínimos ocurren en los años hidrológicos 2009-2010 y 1994-1995 con 989.7 mm y 230.8 mm respectivamente. La alta variabilidad de la zona y la diferencia entre años secos y húmedos es visible a lo largo de los años siendo más acentuada en los últimos 20 años analizados.

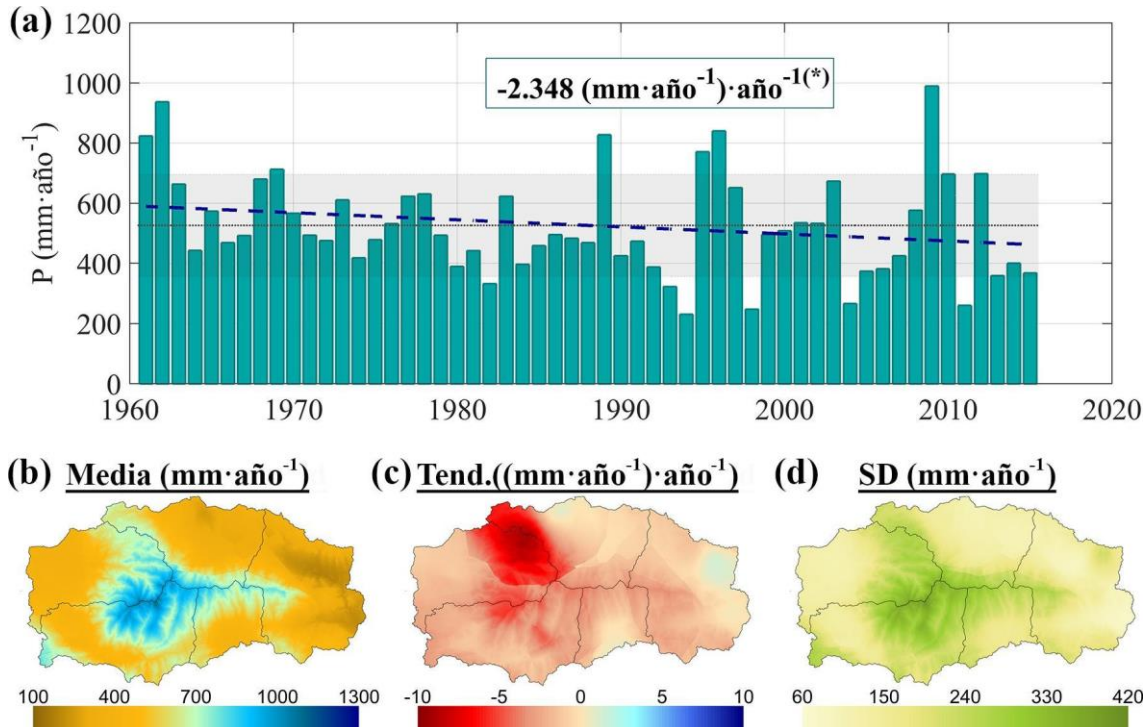


Figura 1.7 (a) Evolución de precipitación anual en el periodo 1961-2015 promediada en el área de estudio: línea discontinua: tendencia de la evolución; línea continua: valor medio del periodo de estudio; área sombreada: desviación típica de la variable. (b) mapa distribuido del valor medio de precipitación anual (c) tendencias distribuidas en el área de estudio para la precipitación anual (d) mapa de la desviación típica distribuida para la precipitación en el periodo de estudio 1961-2015.

El análisis distribuido se muestra en la Figura 1.7.(b, c y d). Las zonas de cotas por encima de los 1500 m s.n.m. son las que aportan valores medios superiores a los 700 mm de precipitación anual de media para todo el periodo de estudio. Por el contrario, las zonas más secas se observan en la parte Este de la región de Andarax (R2). La Figura 1.7.a muestra la variabilidad del régimen de precipitación entre áreas dentro de la zona de estudio, la cual se debe de tener en cuenta en el análisis promedio que se muestra en la Figura 1.7.b. Las tendencias en la precipitación Figura 1.7.c, está claramente influenciadas por la interpolación que ha sido llevada a cabo. De manera global se obtienen valores decrecientes de precipitación que alcanzan sus valores más desfavorables en el valle entre las regiones R3 y R4 (Fardes y Genil) y las zonas más húmedas reflejadas Figura 1.7.b. A la vista de los resultados obtenidos, existen pequeñas áreas en las que la tendencia en precipitación es positiva. Dichas áreas se encuentran en la parte norte de la cuenca del Andarax (R2), áreas representativas del clima árido de la zona. Toda la vertiente sur de Sierra Nevada queda enmarcada en tendencias decrecientes, próximas a la media obtenida para la zona y el periodo estudiado $2.348 \text{ mm} \cdot \text{año}^{-1}$, siendo los picos las zonas más desfavorables. Con respecto a la desviación típica de la variable en cada uno de los píxeles analizados, una alta variabilidad fue encontrada siendo más acentuada cuanto mayor es la cota para analizar en los que valores de 420 mm de diferencia pueden ser encontrado entre años.

El estudio sobre la ocurrencia de la precipitación se muestra con la variable Dpre en la Figura 1.8. La tendencia es decreciente para la variable analizada decreciente con un nivel de confianza

del 99% con una pérdida de 0.75 días al año menos de precipitación. El análisis distribuido, los mapas obtenidos (Figura 1.8.a) están claramente influenciados por la interpolación que fue llevada para su obtención. A la vista de los resultados obtenidos, existen pequeñas áreas en al que la tendencia en precipitación es positiva (Figura 1.8.c). Dichas áreas se encuentran principalmente localizadas en la cara sur (R1, R2 y R5). Las zonas con tendencias más severas rondan la pérdida de más de un día menos de precipitación al año y se ubica en la zona de transición entre Genil (R4) y Fardes (R3). Los patrones encontrados en los valores medios (Figura 1.8.b) se asemejan a los analizados previamente para las tendencias e igualmente influenciados por las interpolaciones. Observándose valores más áridos en la zona de Andarax (R2) y por el contrario valores húmedos en las cumbres de la Sierra y la zona de transición entre Sierra Nevada y la Sierra de Huétor.

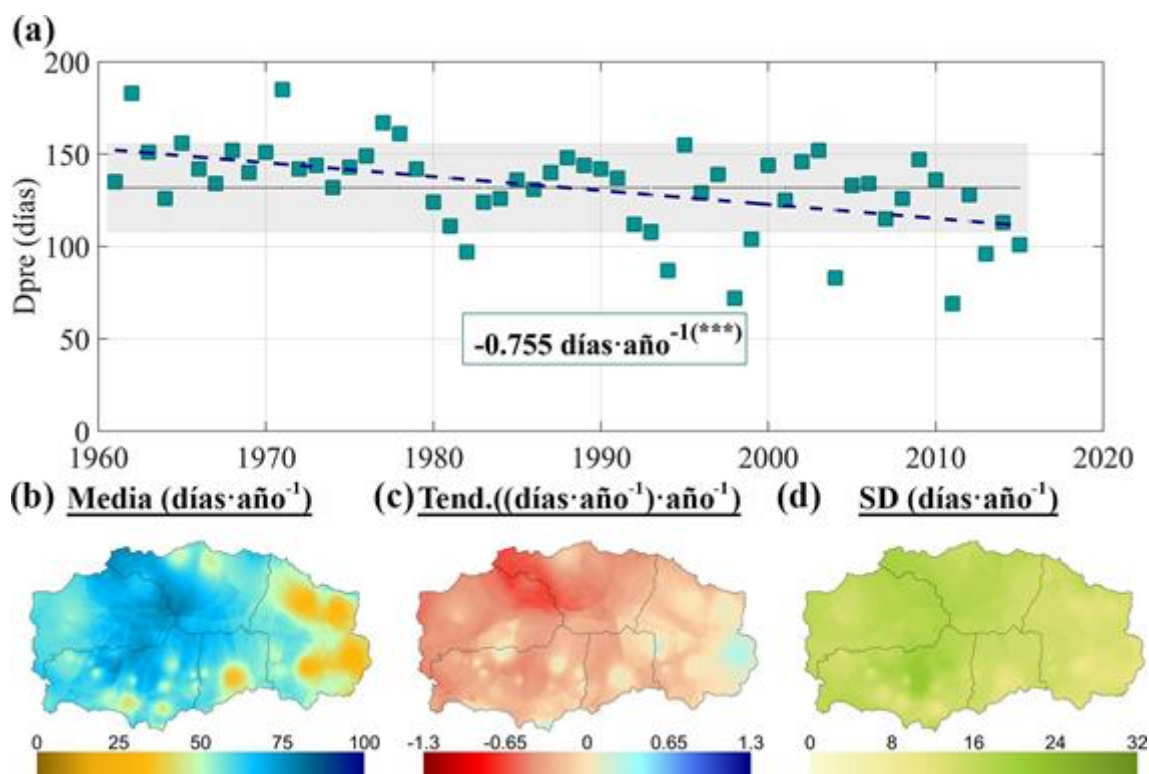


Figura 1.8 (a) Evolución del número de días con precipitación anual en el periodo 1961-2015 promediada en el área de estudio: línea discontinua: tendencia de la evolución; línea continua: valor medio del periodo de estudio; área sombreada: desviación típica de la variable. (b) mapa distribuido del valor medio de precipitación anual (c) tendencias distribuidas en el área de estudio para la precipitación anual (d) mapa de la desviación típica distribuida para la precipitación en el periodo de estudio 1961-2015

La tabla 1.1 muestra los principales descriptores obtenidos en la zonificación dentro del área del Parque según en la presencia y ocurrencia de precipitación. Se identifica la región de Andarax (R2) como la más árida, seguida por Fardes en términos de magnitud de precipitación. Siendo R1 (Adra) la que concentra su precipitación en un menor número de días al año. Por el contrario, la región más húmeda corresponde a la región del Guadalfeo (R5), seguida en magnitud por Adra y Genil en las primeras tres décadas analizadas, y claramente por Adra (R1) en los últimos 20 años analizados. No obstante, los pocos días de precipitación en la R1 aportan el carácter torrencial de la precipitación en esta región. La variabilidad regional entre años es más apreciable en años húmedos que en secos. Siendo en estos últimos valores muy similares entre regiones (el análisis regional se encuentra en el Anexo A). Para todas las regiones se observan tendencias decrecientes de cambio significativas. Siendo la zona Oeste, con las regiones R3, R4 y R5 las que presentan un régimen decreciente más severo y con mayor significancia estadística que las regiones ubicadas en la zona Sur Este (R1 y R2).

Tabla 1.1 Estadísticos del régimen de precipitación para cada región (Fig. zona de estudio) en el área de estudio, junto con las tendencias medias anuales obtenidas durante el periodo analizado 1961-2015. Los resultados del análisis de tendencias se definen según la prueba de Mann-Kendall como (1) significancia del $\alpha=0,01$ (**); (2) significancia del $\alpha=0,05$ (*); (3) significancia del $\alpha=0,1$ (+); o (4) sin significancia, $\alpha>0,1$ (+)

Precipitación anual (mm/año)					
	Máxima	Media	Mínima	Desviación	Tendencia
ADRA (R1)	1242,3	581,3	230,8	206,6	-1,73(*)
ANDARAX (R2)	894,7	388,3	267,9	134,6	-1,14(*)
FARDES (R3)	883,8	471,2	171,5	151,2	-2,18(**)
GENIL (R4)	1146,0	571,05	215,8	183,8	-3,88(**)
GUADALFEO (R5)	1193,3	660,43	217,5	226,6	-2,66(**)
TOTAL	989,4	526,20	241,5	169,9	-2,34(*)
Días al año con Precipitación (días)					
	Máxima	Media	Mínima	Desviación	Tendencia
ADRA (R1)	147	98,0	50	18,5	-0,32(*)
ANDARAX (R2)	146	102,1	54	20,3	-0,42(*)
FARDES (R3)	185	118,9	65	22,4	-0,83(***)
GENIL (R4)	156	109,7	56	20,6	-0,65(***)
GUADALFEO (R5)	164	114,9	65	21,5	-0,57(***)
TOTAL	185	131,8	69	23,9	-0,75(***)

Evolución a escala mensual

El análisis del régimen de magnitud y ocurrencia de la precipitación a escala mensual se presenta en la Figura 1.9. La evolución se muestra en gráficos de cajas que representan los valores obtenidos para cada mes de los 55 años hidrológicos analizados. Además, las evoluciones obtenidas en esos meses se representan con triángulos para cada mes. En relación con la magnitud, el análisis muestra variabilidad entre meses analizados. Siendo diciembre, con una media de 77,5 mm el más húmedo y el que presenta un carácter más variable, con valores que pueden alcanzar los 294 mm en años extremos. En relación a la ocurrencia, no se observa gran variabilidad entre los meses de octubre y marzo. No observándose una relación entre el mes de ocurrencia y la estación del año en la que se encuentre. Siendo más visible para los meses de verano, cuyo periodo oscila de media de 4 días de precipitación para toda la estación.

Comportamientos similares en la evolución son encontrados a los encontrados a la misma escala temporal en el apartado del análisis puntual (ver apartado 1.3.1.1 Análisis puntual. Figura 1.4). No obstante, no todos los meses coinciden con las tendencias encontradas para las escalas temporales. Aunque a escala anual, la tendencia en precipitación sea negativa, de manera generalizada un aumento de estas es encontradas para los meses de agosto y septiembre que coincide con un aumento no significativo en el número de días de precipitación para septiembre, pero un decrecimiento para agosto. Lo cual supone una redistribución de las precipitaciones en los veranos, y más concentradas en el tiempo para el caso de los agostos, aumentando así los eventos torrenciales en dicho mes.

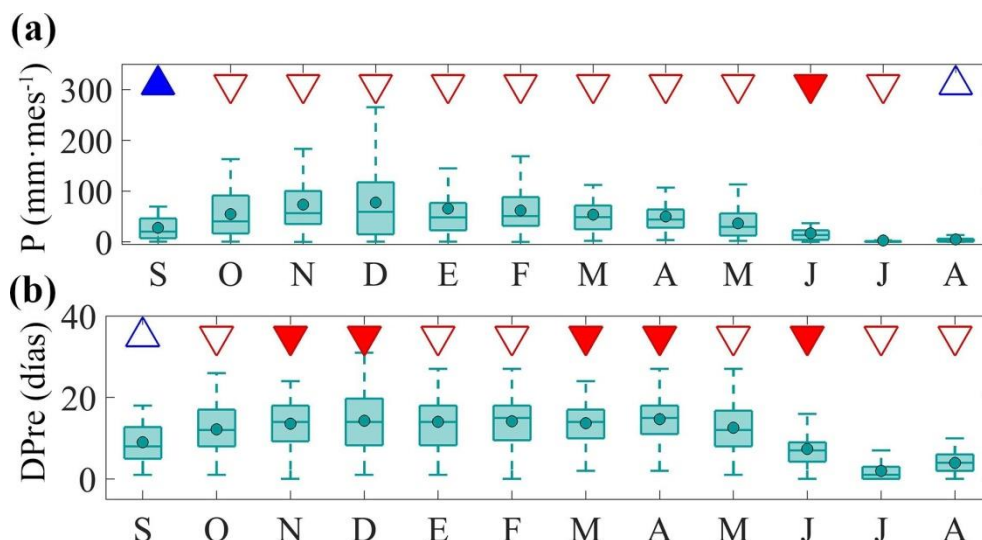


Figura 1.9 Diagrama de cajas sobre la evolución del régimen de precipitación mensual: a) P, precipitación mensual; b) Dpre, número de días al mes con precipitación. Tendencia encontrada en cada uno de los meses del año: triángulo rojo: evolución decreciente; triángulo azul: evolución creciente. En ambos casos, el triángulo relleno refleja las estaciones con tendencia estadísticamente significativa con nivel de confianza del 90%.

1.3.2 Análisis de tendencias del régimen de temperaturas

1.3.2.1 Análisis puntual

Este apartado muestra la evolución del régimen de temperaturas para los datos diarios de un total de 28 estaciones disponibles en la zona (Figura ii) a diversas escalas temporales. El análisis se realiza en magnitud, con la evolución de temperatura media, y en ocurrencia, con la variable asociada a la temperatura mínima ($DT_{min} < 0^{\circ}C$). Al igual que para el régimen de precipitación, el análisis se realiza teniendo en cuenta la región en la que se encuentran ubicadas cada una de las estaciones meteorológicas (diferentes colores en la figura) así como la localización de estas (menor a mayor cota, de izquierda a derecha de arriba a abajo).

Evolución a escala de década

La evolución de la temperatura media diaria anual para cada una de las estaciones históricas analizadas se muestra en la Figura 1.10. A simple vista, destaca la poca variabilidad que existe entre los valores analizados, y la homogeneidad entre décadas salvo por un leve carácter creciente. Si bien es cierto, que se observa un carácter cíclico con duración de 3 décadas de estudio, que es más visible para las estaciones ubicadas en cotas superiores a los 1000 m s.n.m. Con un valor medio para todas las estaciones y décadas de $14.87^{\circ}C$, se observa como la temperatura decrece en función de la cota a la que se encuentra las estaciones, variando entre los $17.27^{\circ}C$ para las estaciones ubicadas en cotas inferiores a los 500 m s.n.m. y los $10.97^{\circ}C$ para las localizadas en cotas superiores a los 1500 m s.n.m.. En cotas superiores, no es posible obtener un valor debido a la falta de estaciones históricas en dichas cotas (Figura iv). En un análisis por décadas, con independencia de realizarlo de manera global, por regiones o cotas se obtiene que la década más fría corresponde a los años hidrológicos 1970-1979 (D2). Sin embargo, la década más cálida en valor medio es la D6 (2010-2015), seguida de la década D4 (1990-1999), en el análisis por regiones y cotas. No obstante, se debe de tener en cuenta la falta de 4 años hidrológicos en el análisis de la D6.

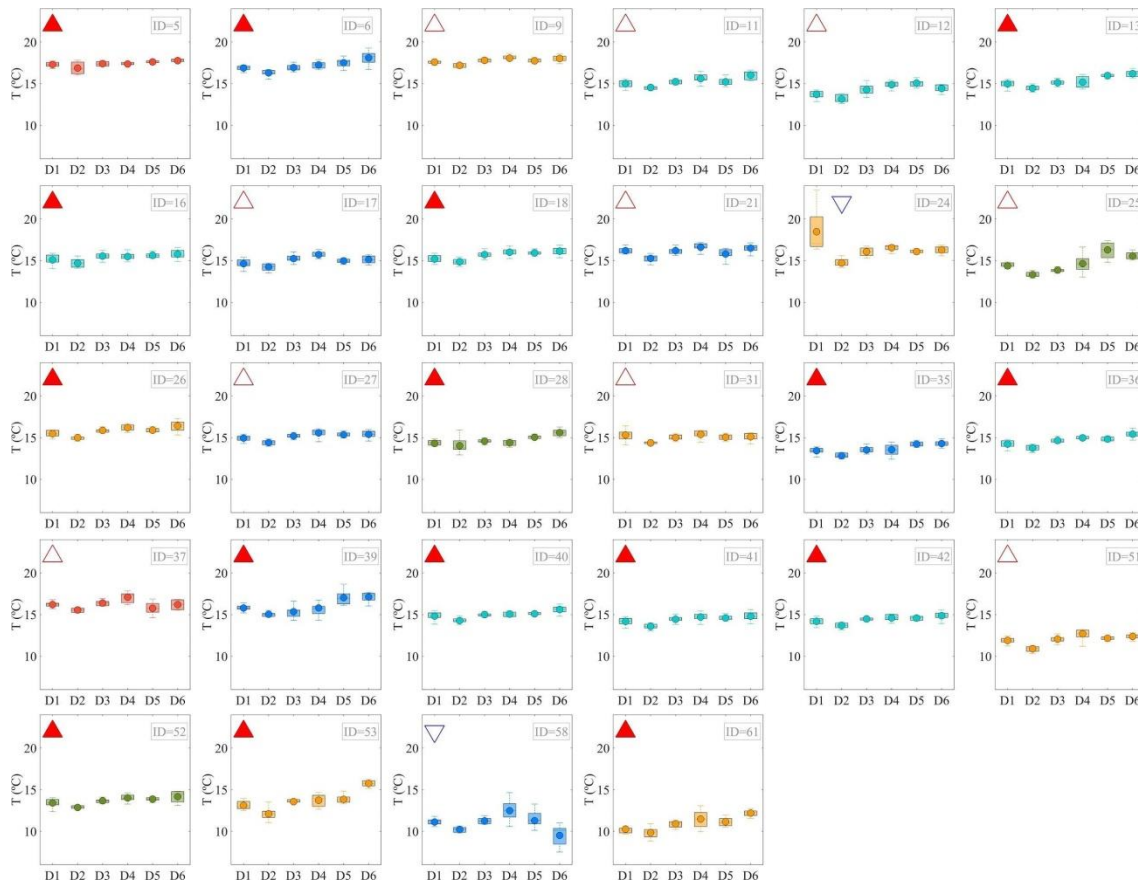


Figura 1.10 Evolución de la temperatura diaria media anual por décadas en las estaciones meteorológicas ubicadas en las diferentes regiones (R1: rojo; R2: naranja; R3: verde oliva; R4: turquesa; R5: azul). Tendencia encontrada en cada una de las estaciones: triángulo rojo: tendencia positiva; triángulo azul: tendencia negativa. (Triángulo relleno, significancia estadística igual o superior al 90% de confianza).

El análisis regional, muestra como región más cálida la R1 (Adra) con una media de 16.79 °C para las 6 décadas analizadas y la más fría la R3 (Fardes) con una media de 14.33°C. Sin embargo, debido a la no homogeneidad entre regiones sobre la distribución de las estaciones este análisis no tiene mucho peso comparativo.

Las evoluciones observadas arrojan un carácter creciente para 26 de las 28 estaciones analizadas. De las cuales 16 de ellas tienen tendencias con nivel de confianza superior al 90%. Las estaciones con significancia se ubican en su mayoría en banda de cota inferior a los 500m s.n.m. y la correspondiente entre 1000 y 1500 m s.n.m. Las dos estaciones que muestran evolución decreciente no proyectaron tendencias significativas y se ubican en la región de Andarax (R2, ID=24) y Guadalfeo (R5, ID=58).

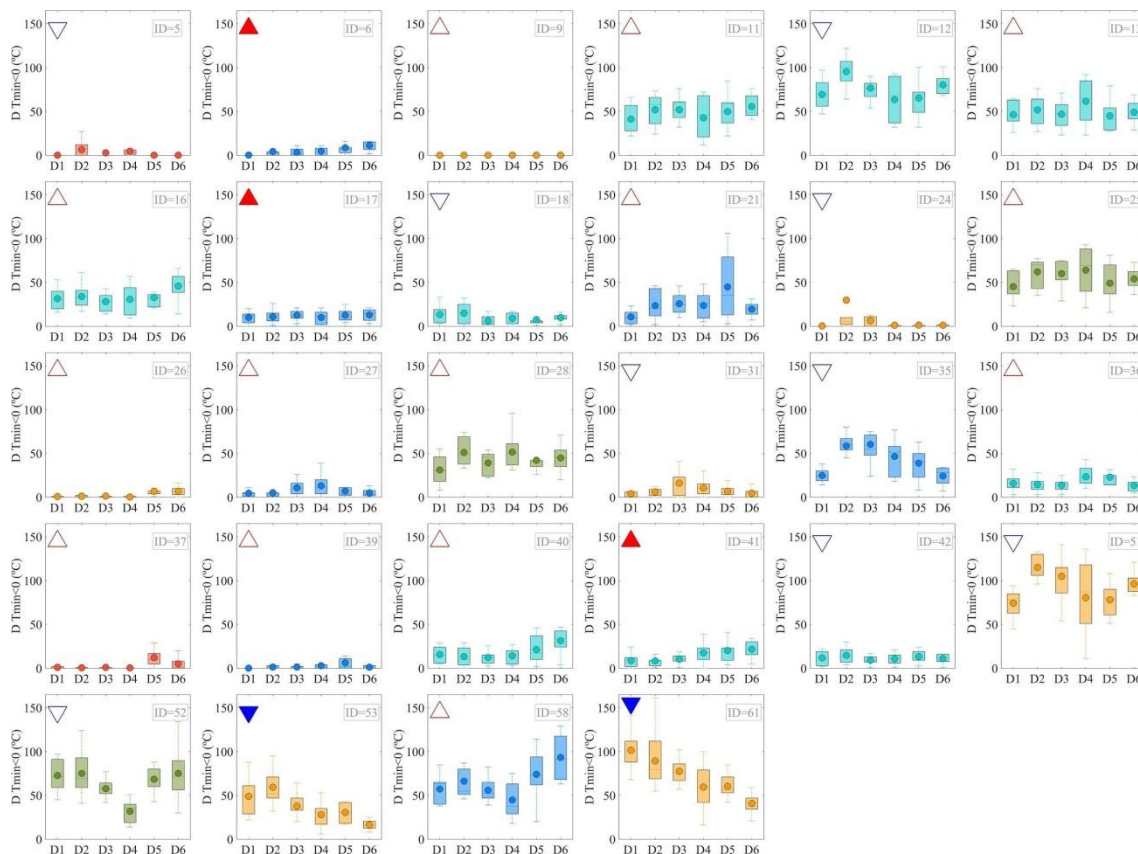


Figura 1.11 Evolución de la variable Días al año con temperatura mínima inferior a 0 °C por décadas en las estaciones meteorológicas ubicadas en las diferentes regiones (R1: rojo; R2: naranja; R3: verde oliva; R4: turquesa; R5: azul). Tendencia encontrada en cada una de las estaciones: triángulo rojo: tendencia positiva; triángulo azul: tendencia negativa. (Triángulo relleno, significancia estadística igual o superior al 90% de confianza).

La evolución por décadas de la variable derivada del número de días con temperatura inferior a 0 °C se muestra en la Figura 1.11. La variabilidad entre regiones y por banda de cota es visible en la figura. Con un valor medio para todas las estaciones y décadas de 29.43 días con temperatura mínima inferior a 0 °C, se observa que la década con menos días fríos (26.46 Días de media) es la D1 (1961-1969). Siendo la D2, en valor medio, la que presenta una media de 34.46 días de temperatura mínima inferior a 0 °C. No obstante, ambas décadas son las que presentan además en término medio, la mayor (D2) y menor (D1) desviación típica, con un valor de 14.28 y 9.39 días respectivamente. El análisis por banda de cotas resulta interesante de analizar, ya que los valores oscilan entre los 3.85 días para las estaciones ubicadas en cotas inferiores a los 500 m s.n.m. y 68.41 días para las estaciones situadas en cotas superiores a los 1500 m s.n.m. A pesar, de la diferencia entre bandas de cotas, se sigue conservando para todas ellas que la década con menos días de temperatura inferior a 0 °C es la D1, seguida de la D4 (1990-1999) y la década con más días fríos es la D2 (1970-1979). Esta evolución se repite de nuevo en la escala espacial de regiones. Con excepción de la zona suroeste (R1 y R5) en las que la década más fría es la D5 (2000-2009) seguida de la D2 (1970-1979). De manera regional, con una media de 54.21 días de media en los 55 años analizados, se considera la región de Fardes (R3) como la que tiene más días con temperaturas mínimas inferiores a 0 °C. Siendo la menos fría la región R1 (Adra) con una media de 2.82 días al año con temperaturas inferiores a los 0 °C.

Una vez analizado los valores y estadísticos de las décadas, se realizó un análisis en las tendencias encontradas. De las 28 estaciones en las que se ha analizado la variable días al año con temperatura inferior a 0 °C en la escala de década, 11 presentaron una tendencia decreciente

ubicadas 5 de ellas en la R2 (Andarax). Por consiguiente, un total de 17 estaciones resultaron tener una tendencia creciente entre décadas del número de días con temperatura mínima inferior a 0 °C, las cuales se localizan en su mayoría en la zona oeste (R4 y R5). De las estaciones analizadas, solo un 17% de las estaciones arrojaron tendencia significativa en la escala de década, no encontrando ninguna relación entre ellas con respecto a su ubicación.

En resumen, la escala de década para las variables observadas de temperatura media y su asociada, el número de días al año con temperatura mínima menor de 0 °C, resulta ser una buena escala para comprender la evolución en los 55 años de estudio. Su estudio en un total de 28 estaciones ubicadas a distintas cotas de altitud sirve para observar el gradiente térmico altitudinal. La temperatura media tiene un carácter homogéneo con respecto al número de días con temperatura inferior a 0 °C, cuyo carácter es más oscilante sobre todo en las estaciones ubicadas en cotas altas. Debido a esto, las tendencias encontradas, son significativas estadísticamente para el caso de las temperaturas mínimas y no significativas en la mayoría de los casos para la variable DTmin. Como conclusión inicial, en ambas variables, se observa que la región más fría es la R3 (Fardes) y la más cálida la R1 (Adra). No obstante, se debe tener en cuenta la distribución de las estaciones y como la carencia de datos homogéneamente distribuidos en todas las regiones pueden alterar los resultados previos. La tendencia al aumento para las temperaturas medias, proyectan un carácter más árido a lo largo de las décadas analizadas. Los 6 años de la última década (D6) analizados en el estudio, corroboran un aumento de las mismas. No obstante, el aumento del número de días con temperaturas inferiores a los 0 °C es palpable sobre todo en la parte oeste de la zona de estudio, la cual puede estar influenciada por el clima atlántico.

Evolución a escala anual

La figura 1.12.a muestra la evolución para cada una de las estaciones de los valores medios anuales de la temperatura media anual y su variable asociada DTmin para los 55 años de estudio. El estudio de la evolución anual de las temperaturas medias muestra en primer lugar que la hipótesis del gradiente lineal se observa en las 28 estaciones en las que se ha realizado el análisis. La temperatura media diaria anual, varía entre 17.22°C para el caso de las dos estaciones que se encuentra en cotas inferiores a los 500m s.n.m., y una media de 10.98°C en el caso de estaciones situadas en cotas que oscilan entre los 1600 y 1800 m s.n.m. A pesar del descenso de las temperaturas encontrado en función de la altura, un carácter oscilante se observa en las estaciones ubicadas entre los 500 y 1000 m s.n.m., siendo la influencia del gradiente más acentuada y de manera lineal en las estaciones situadas por encima de los 1000 m s.n.m. No obstante, una leve variabilidad es observada entre regiones. En el análisis regional, la región de Adra (R1) situada en la cara sur de la sierra, con una temperatura media de 16.77 °C para todas las dos estaciones de la zona es la que presenta un carácter más cálido. La región R3 (Fardes) situada en la cara norte aporta temperaturas inferiores registradas con una temperatura media de 14.26 °C. No obstante, al igual que en la escala de década, el análisis no puede considerarse comparativo debido a que las cotas a las que se encuentran ubicadas las estaciones difieren entre las regiones analizadas. El mapa de tendencias se muestra en la figura 1.12.c. De las 28 estaciones analizadas solo una, considerada en la región de Andarax (R2), pero fuera de los límites definidos para este estudio, a 812 m s.n.m. presenta una evolución decreciente no significativa estadísticamente. De las 27 estaciones restantes, 25 presentan un aumento en las temperaturas medias anuales con significancia estadística superior a $\alpha=0,1$ de confianza según el test de Mann-Kendall. Destaca el interés, en que la cara norte de la sierra, que presenta tendencia creciente significativa en todas las estaciones analizadas. Con respecto a las

estaciones con evolución creciente, pero no significativas estadísticamente, todas se ubican en la cara sur. Por un lado, dos de ellas, las situadas en la R1 y R2 (Adra y Andarax) se encuentran en altitudes cercanos a los 1000 m s.n.m.. La tercera del análisis, se ubica en la región del Guadalfeo (R5) a aproximadamente unos 1600 m s.n.m.. Esta evolución no significativa puede ser debido a la variabilidad existente en los datos observados, debido a que las tres estaciones se encuentran en zona de transición, sin olvidar que dicha zona de transición en la región del Guadalfeo está en una banda de cota superior, ya que alberga las mayores altitudes del macizo montañoso.

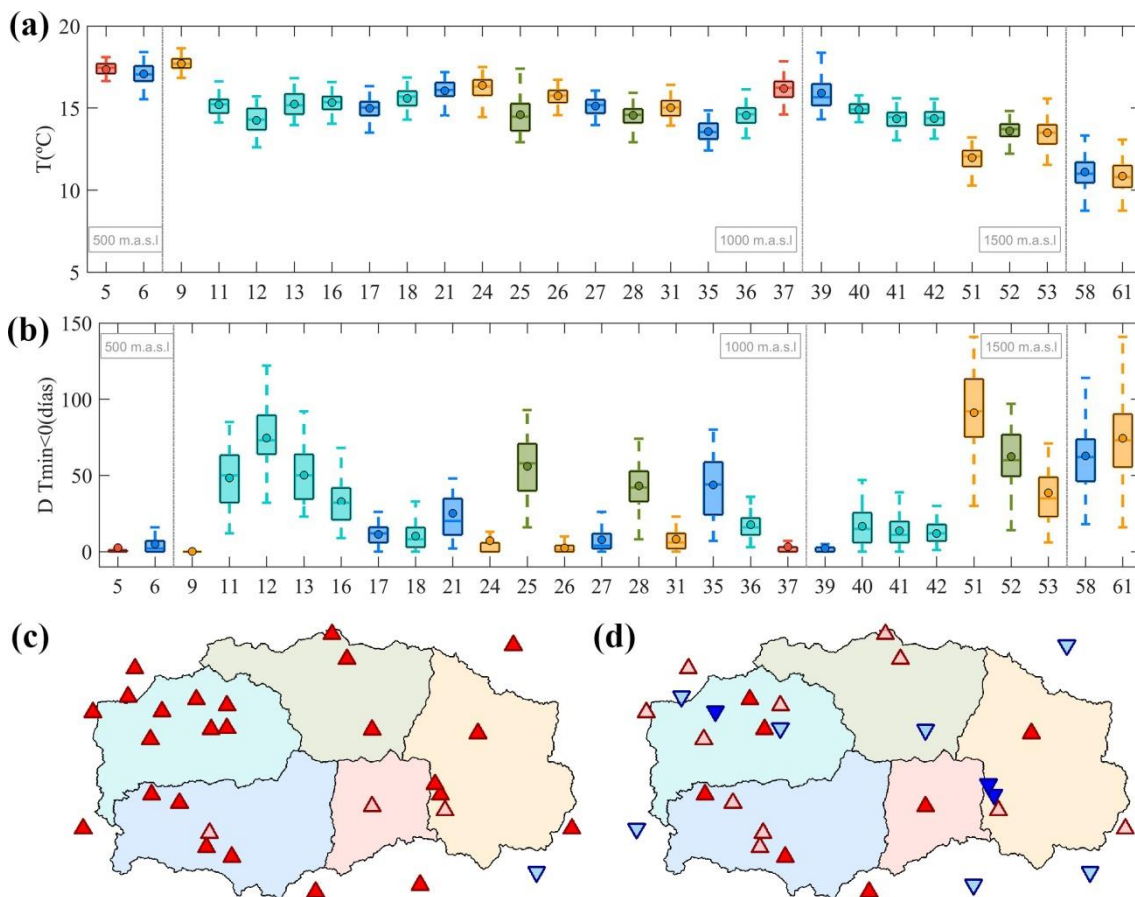


Figura 1.12 Evolución de temperatura media diaria anual (a) y los días con temperatura mínima inferior a 0 °C al año (b) en las estaciones analizadas en las diferentes regiones (R1: rojo; R2: naranja; R3: verde oliva; R4: turquesa; R5: azul). Mapa de localización de las estaciones meteorológicas con datos de temperatura con la tendencia encontrada en la variable temperatura media (c) y la variable derivada DTmin (d): Triángulo rojo: tendencia creciente; Triángulo azul: tendencia decreciente. En ambos casos, la intensidad del color refleja las estaciones con tendencia estadísticamente significativa con nivel de confianza superior al 90%.

La variable derivada de la temperatura mínima observada muestra su evolución anual y su mapa de tendencias observadas en figura 1.12.(a y c). En comparación con la temperatura media, analizada anteriormente, se observa en esta nueva variable una heterogeneidad en función de la altitud y la región en la que se ubique la estación. La escala regional, muestra como con independencia de la altura en la que se localice la estación, la R1 (Adra) tiene valores cercanos a 0 días al año con temperaturas mínimas de 0 °C, corroborando con la escala de década la R1 como la más cálida de las que componen Sierra Nevada. Con un valor medio de 53.87 días de media al año con temperatura mínima inferior a 0 °C, la región R3 (Fardes) se identifica como la más fría. No obstante, solo se han considerado 3 estaciones que no suponen representatividad en todas las bandas de cotas. Las regiones R2 y R5, muestran un carácter creciente en relación directa con la cota en la que se encuentre la estación a analizar. No obstante, la evolución en Guadalfeo (R5) es más lineal que para el caso de la región del Andarax (R2), que en cotas

inferiores a los 1000 m s.n.m. tiene valores medios de 4.5 días al año de temperatura mínima inferior a 0 °C y en valores por encima de los 1000 m s.n.m. aporta valores por encima de los 68 días de media. Finalmente, el caso de la región R4 (Genil), es de especial interés, debido a que es la única región que muestra una relación inversamente proporcional a la altitud de la estación. Esta evolución puede ser debida a que las estaciones ubicadas en cotas superiores a los 1000 m s.n.m. están influenciadas por la zona de transición con el parque Sierra de Hueétor, y las que están en cotas bajas están más dominadas por la influencia atlántica previa a encontrarse con las altas cumbres donde pierde influencia.

El análisis de tendencias se muestra para los datos observados en los 55 años analizados para los días con temperaturas mínima inferiores a 0 °C al año se muestra en la figura 1.12.d. Las tendencias encontradas no son tan claras como las observadas para la temperatura media (Figura 1.12.c). De manera contraria a la temperatura media, donde la significancia estadística en las tendencias crecientes es característica. Para DTmin, solo 11 de las estaciones presentan significancia estadística superior a $\alpha=0,1$. En relación al carácter, 18 estaciones arrojan un aumento del número de días con temperaturas inferiores a los 0 °C y las 10 restantes un decrecimiento. En relación entre la tendencia y la ubicación de las estaciones, se observa como la influencia decreciente del número de días con temperaturas inferiores a los 0 °C es más acentuada en la zona Oeste. Siendo la zona Este, con la influencia mediterránea, más típica de tendencias crecientes de días con temperaturas inferiores.

En conclusión, la escala anual para las variables relacionadas con la temperatura presenta una clara tendencia creciente para los valores observados en las temperaturas medias diarias anuales, al igual que la zona Este de Sierra Nevada para el caso de los días con temperaturas mínimas inferiores a 0 °C.

Evolución a escala mensual

La última escala temporal analizada fue la mensual. Para cada una de las estaciones meteorológicas los valores de temperatura diaria media mensual (Figura 1.13) y el número de días con temperaturas inferiores a 0 °C mensuales (Figura 1.14), fueron analizados para los 55 años de estudio. Gráficamente, para la temperatura media, se observa una disminución de las medias mensuales entre los meses de septiembre y enero y un aumento de la temperatura a partir de febrero hasta el término del año hidrológico en agosto. La evolución en meses para los días al mes con temperaturas mínimas inferiores a 0 °C es inversa a la encontrada en la temperatura media, volviendo a ser el punto de inflexión el mes de enero.

Al centrarse en la temperatura (Figura 1.13), a escala puntual, se confirma enero como el mes más frío, salvo para la región del Guadalfeo (R5) ubicada a aproximadamente 1600 m s.n.m.. De manera global, con una media de 24.46°C se define julio como el mes con temperatura media diaria más alta para las 28 estaciones analizadas. Sin embargo, al realizar el análisis por regiones de interés y no en valores globales para todas las estaciones se observan diferencias. Por tanto, para las estaciones ubicadas en la región de Fardes (R3) y la región de Adra (R1) los meses más cálidos son julio y agosto, respectivamente. Para el caso de la región R2 y R4, el mes más cálido se define en función de la altitud en la que se encuentren las estaciones. Por ello, en R2 para las estaciones ubicadas a cotas inferiores a los 1000 m s.n.m. el mes más cálido es agosto. Siendo julio, el mes más cálido para las estaciones de R2 situadas por encima de los 1000m s.n.m. En el caso de R4, ocurre a la inversa, siendo julio y agosto para menor y mayor cota de ubicación de la estación. En este sentido, una variabilidad en la zona del Guadalfeo (R5), fue encontrada para los meses cálidos con indiferencia de la cota de la estación analizada.

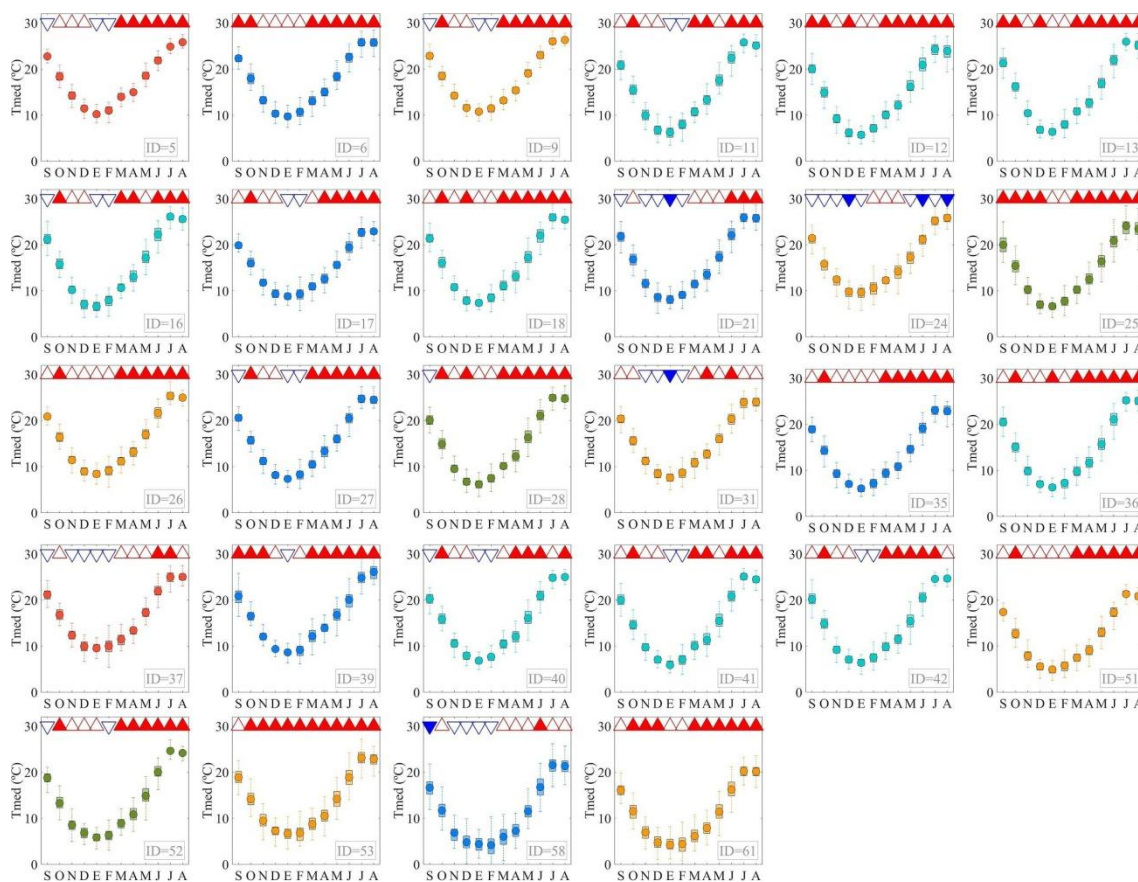


Figura 1.13 Diagrama de cajas sobre la evolución de la temperatura media diaria mensual para cada una de las estaciones analizadas en las diferentes regiones (R1: rojo; R2: naranja; R3: verde oliva; R4: turquesa; R5: azul). Tendencia encontrada en la variable en cada uno de los meses del año: Triángulo rojo: tendencia creciente; Triángulo azul: tendencia decreciente. En ambos casos, la intensidad del color refleja las estaciones con tendencia estadísticamente significativa con nivel de confianza superior al 90%.

Debido a la inexistencia de días con temperaturas inferiores a 0 °C en los meses de verano, el análisis mensual de esta variable (Figura 1.14) se centra en los meses comprendidos entre noviembre y abril. Entre ellos, y en relación con las temperaturas medias, se considera enero el mes en el que más días se han observado temperaturas inferiores a los 0 °C en los 55 años de estudio. Considerando este hecho, los valores aumentan en relación directa a la cota en la que se ubiquen, pudiendo oscilar en valores medios entre 1 día y 18 días al mes para estaciones por debajo de los 500 m s.n.m. y por encima de los 1500 m s.n.m.. En todos los meses considerados para el análisis, y a escala regional, se observa como Adra (R1) debido a que con independencia de la altura de la estación y el mes analizado los valores oscilan en 0 días, es la región con menos días al año con temperaturas por debajo de 0 °C. Existiendo valores superiores que pueden llegar incluso a 30 días al mes, para el resto de las regiones. Cabe destacar, como el gradiente altitudinal es visible en esta variable para las regiones R2, R3 y R5. Sin embargo, se observa una relación inversamente proporcional entre la altitud y el número de días con temperatura inferior a 0 °C, para la región de Genil (R4).

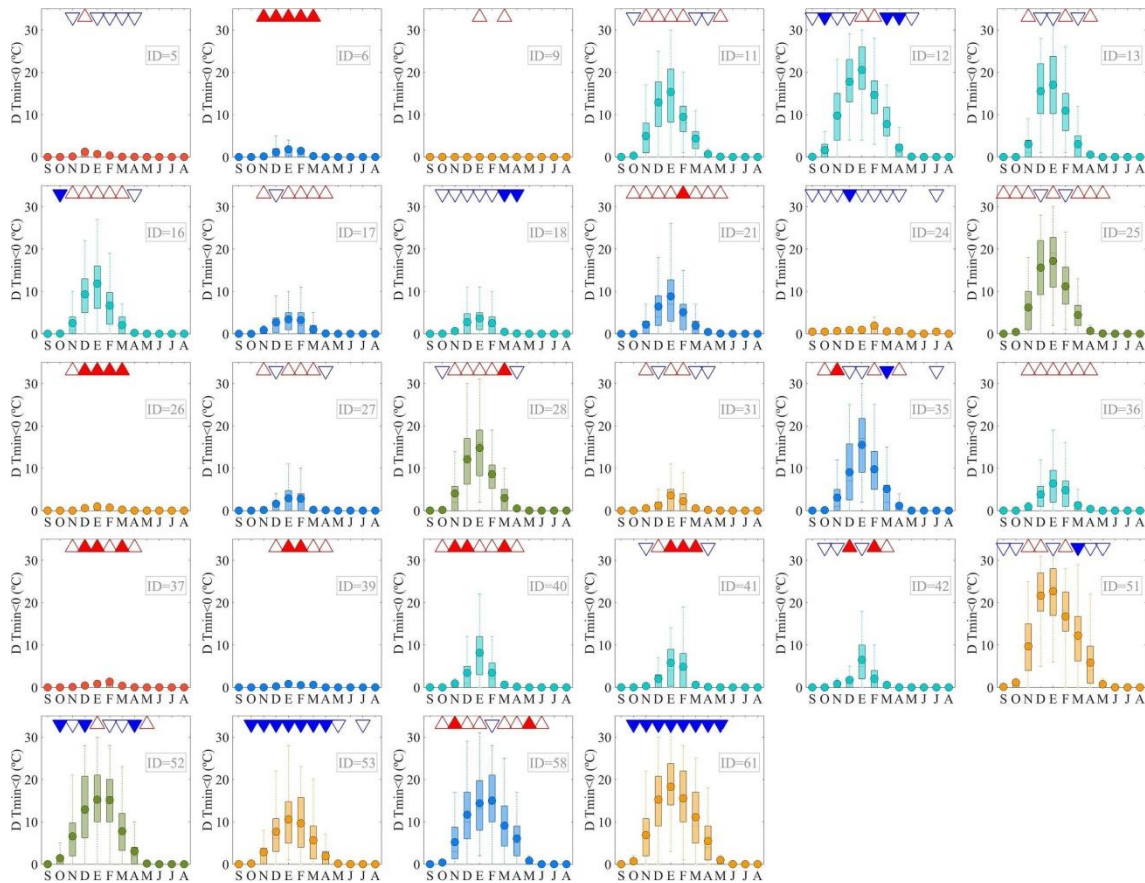


Figura 1.14 Diagrama de cajas sobre la evolución del número de días al mes con temperaturas inferiores a 0 °C para cada una de las estaciones analizadas en las diferentes regiones (R1: rojo; R2: naranja; R3: verde oliva; R4: turquesa; R5: azul). Tendencia encontrada en la variable en cada uno de los meses del año: Triángulo rojo: tendencia creciente; Triángulo azul: tendencia decreciente. En ambos casos, la intensidad del color refleja las estaciones con tendencia estadísticamente significativa con nivel de confianza superior al 90%.

En relación para ambas variables analizadas, la tendencia es claramente creciente en la mayoría de los meses para la variable Tmed. Sin embargo, al igual que en la escala anual, una variabilidad es encontrada entre tendencias positivas y negativas para el caso de los días con temperatura inferior a 0 °C.

1.3.2.2 Análisis distribuido

El análisis histórico comprendido entre los años hidrológicos 1961-2015, para la temperatura a escala espacial distribuida se muestra en este apartado. Las variables Tmax, Tmed y Tmin, junto con la DTmin se muestra a escalas temporales de décadas, año y mes.

Evolución a escala de década

El análisis por décadas para el régimen de temperaturas se muestra en la Figura 1.15. Los valores se muestran como valores promedio y distribuido para toda la Sierra para las temperaturas máximas, medias y mínimas y su variable asociada número de días con temperatura inferior a 0 °C. El carácter creciente es observado para las tres temperaturas analizadas siendo significativo para el caso de las temperaturas máximas. Las temperaturas mínimas, presentan un crecimiento acentuado entre las décadas D2 y D4, sin embargo, las siguientes décadas (D5 y D6) no apoyan el crecimiento observado en décadas previas. La D2 es considerada para las tres temperaturas la más fría de las analizadas. En relación al carácter distribuido de las temperaturas medias se aprecia claramente una disminución del área afectada por las mínimas temperaturas medias (disminución del área azul). En el caso de las temperaturas

máximas un aumento de las temperaturas en las cotas bajas de la cuenca es observado a medida que se analizan las décadas. No obstante, las cumbres no presentan cambio creciente en dichas temperaturas con respecto a las primeras décadas analizadas. Finalmente, las temperaturas mínimas muestran una clara zonificación en las primeras décadas, donde las regiones de Adra y Andarax (R1 y R2) arrojan temperaturas mínimas superiores a las encontradas en el resto de regiones. Sin embargo, dicha zonificación parece ser menos clara en las últimas décadas (D5 y D6). El análisis por regiones realizado (Ver Anejo 2) permite apreciar cómo el carácter cálido de las temperaturas máximas en la R3 (Fardes) queda reflejado en el análisis distribuido por su falta de temperaturas bajas en zonas de cumbre. En término de temperaturas medias, la región de Guadalfeo (R5) es la que presenta un aumento de estas en las cumbres. Las regiones de Adra y Andarax con sus temperaturas mínimas por encima de la media y sus temperaturas máximas elevadas en las zonas de valles se muestran como las regiones con carácter árido.

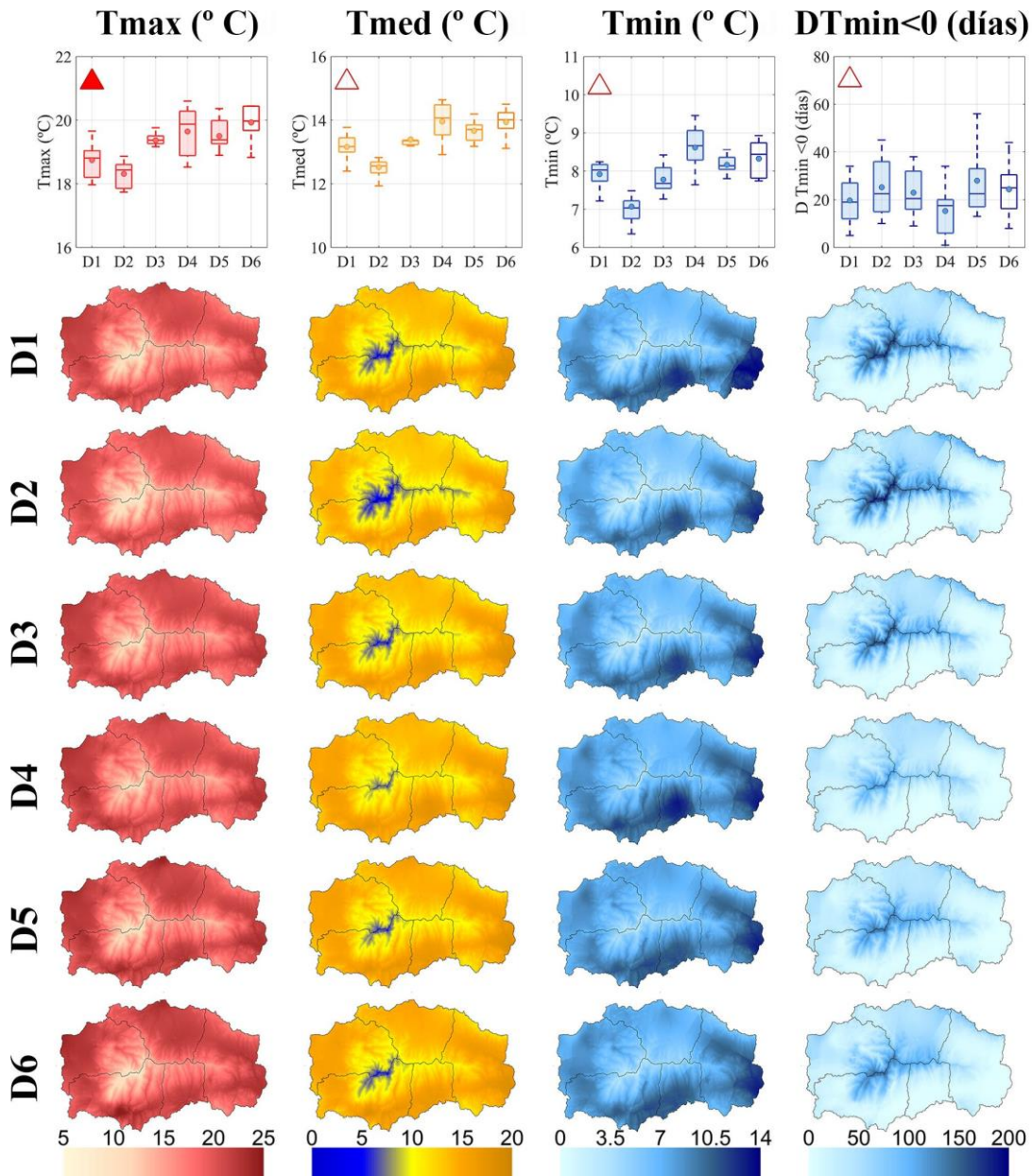


Figura 1.15 Valores distribuidos y promediados de las variables del régimen de temperaturas analizadas a escala decenal en el periodo analizado comprendido entre 1961-2015.

En relación a la ocurrencia de número de días con temperatura inferior a 0 °C. Destaca la D4 (1990-2000) debido a su variabilidad en cuanto a días con temperatura inferior a 0 °C y por no ser la década con menos días en precipitación (Figura 1.6). A nivel general, y al igual que para las variables del régimen de precipitación se observa gran dispersión entre décadas, siendo las tres últimas analizadas las que arrojan valores más extremos entre años.

Evolución a escala anual

La Figura 1.16.a muestra la evolución de las temperaturas medias, máximas y mínimas diarias medias anuales para el periodo 1961-2015. En relación a las tendencias, se encuentran patrones similares para el caso de las tres temperaturas analizadas, siendo cercanas a una ganancia de 0.02°C al año. Para las tres variables los valores extremos superiores se encuentran en las últimas décadas de estudio. Con valores que oscilan entre 14.64 y 11.93 °Cy con una desviación típica de 0.64°C se considera la evolución de la temperatura media con un carácter homogéneo en comparación con las temperaturas máximas y mínimas. Con una desviación típica de 0.73°C la temperatura máxima es la considerada como más heterogénea a lo largo del periodo analizado. Sin embargo, el carácter heterogéneo de las temperaturas mínimas con una desviación de 0.64°C, aun no siendo tan elevado como para las máximas, es considerado como desfavorable por el hecho de influenciar de manera directa en la presencia de precipitación en forma de nieve.

El análisis distribuido se representa para las tres variables en la Figura 1.16 (b-j). Los mapas de tendencias (Figura 1.16.(c,f,i)), al igual que para la variable de precipitación, están influenciados por los algoritmos de interpolación, siendo esta influencia más acentuada para las temperaturas máximas y mínimas. Para el caso de la temperatura máxima Figura 1.16.c y la media Figura 1.16.f, todas las zonas presentan una tendencia creciente, siendo más homogénea para el caso de la temperatura media. En el caso de la temperatura máxima, se observan zonas en las que la tendencia está muy por encima de la tendencia media en la zona de 0.028°C/año⁻¹. Se identifican como zonas más vulnerables la parte este de la región del Guadalfeo (R5), la cuenca del río Adra (R1) y la parte norte de la Región de Andarax (R2), no obstante, se observa una clara influencia de la interpolación por las estaciones situadas en dichas zonas. Cabe destacar el caso de las tendencias en las temperaturas mínimas Figura 1.16.i. Tal y como se ha descrito con anterioridad, la tendencia promedio en la zona es de un crecimiento de 0.02°C al año. Sin embargo, en la escala distribuida la mayoría de las zonas reflejan una tendencia decreciente que oscila entre 0.05-0.1°C en las zonas en las que las temperaturas máximas presentan una tendencia más desfavorable. Una tendencia decreciente para el caso de las temperaturas mínimas se observa en su mayoría en la región de Genil (R4) y zona oeste del Andarax (R2).

Los mapas de distribución de la desviación típica para las tres temperaturas se muestran en la Figura 1.16.(d,g, j). Al igual que en los valores promedios, los valores de desviación para la temperatura media Figura 1.16.g son menos oscilantes que para las otras dos temperaturas. Esto puede ser debido a que el valor medio suaviza los extremos y por tanto su varianza es más homogénea. Aunque los valores son bastante similares para el caso de las temperaturas mínima Figura 1.16.j y las máximas Figura 1.16.d, se observa algo menos de desviación para el caso de la temperatura máxima en la cara norte.

Finalmente, en los valores medios distribuidos Figura 1.16.(b,e, h) para las tres temperaturas analizadas pueden identificarse tres áreas claramente definidas. Una primera coincidente con las zonas de mayor cota, en la que los valores oscilan entre 5°C y 0 °C para las temperaturas máximas y mínimas respectivamente. Una segunda zona, coincidente con cotas medias, en las

que los valores medios oscilan entre los 10 °C y 5°C para temperaturas máximas y mínimas respectivamente. Por último, se identifican zonas en las que los valores medios son superiores a los valores promediados medios calculados para la zona de estudio. Estas áreas se localizan principalmente en las zonas bajas de las cuencas, y siendo más extremas en la cara sur que en la norte.

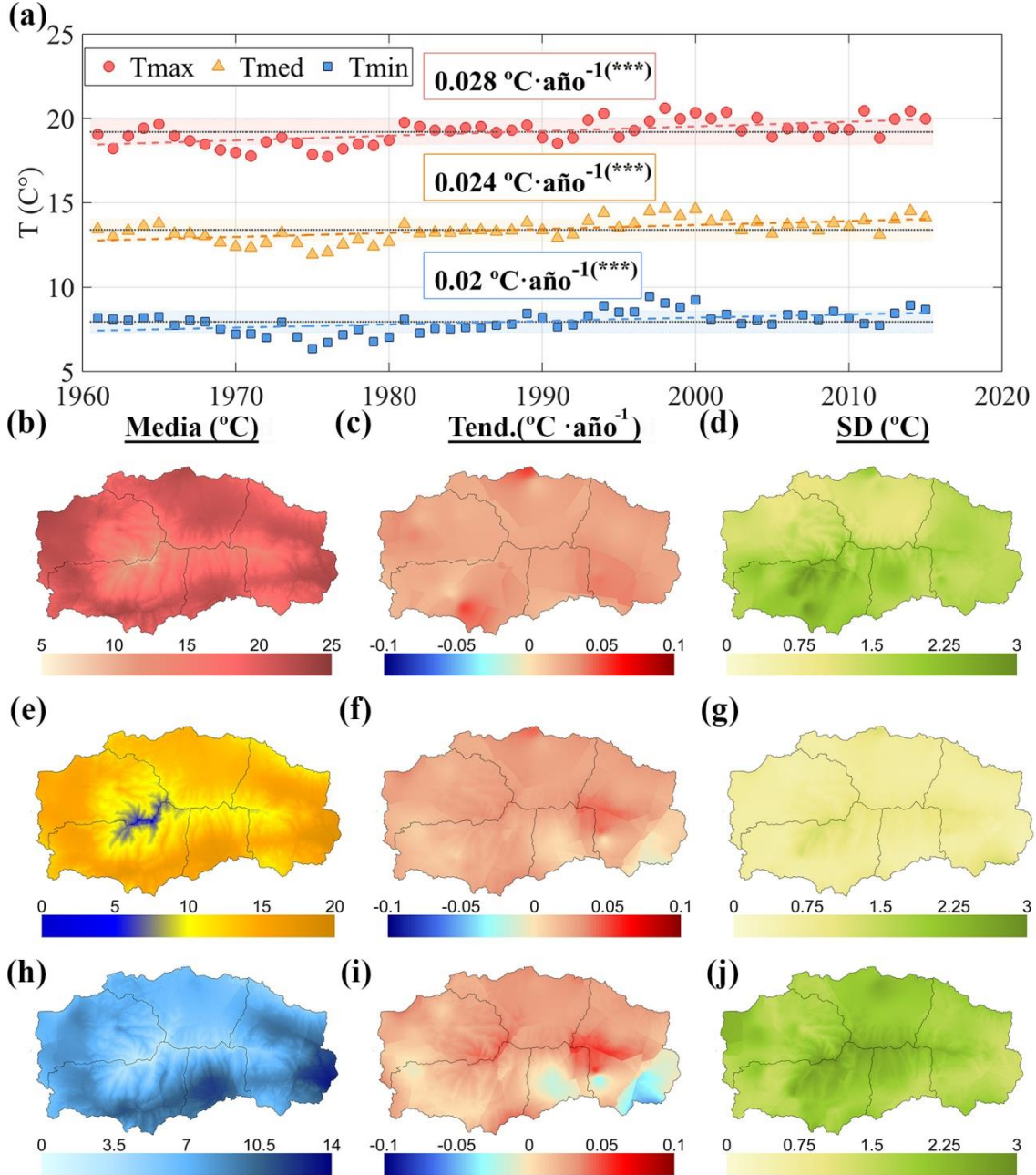


Figura 1.16 (a) Evolución de la temperatura media anual de las máxima, media y mínima diaria en el periodo 1961-2015 promediada en el área de estudio; línea discontinua: tendencia de la evolución; línea continua: valor medio del periodo de estudio; área sombreada: desviación típica de la variable. (b) mapa distribuido del valor medio Tmax. (c) tendencias distribuidas en el área de estudio para la Tmax (d) mapa de la desviación típica distribuida para la Tmax en el periodo de estudio 1961-2015. (e) mapa distribuido del valor medio de Tmed. (f) tendencias distribuidas en el área de estudio para la Tmed. (g) mapa de la desviación típica distribuida para la Tmed en el periodo de estudio 1961-2015. (h) mapa distribuido del valor medio de Tmin. (i) tendencias distribuidas en el área de estudio para la Tmin. (j) mapa de la desviación típica distribuida para Tmin en el periodo de estudio 1961-2015.

El caso del número de días con temperatura inferior o igual a 0 °C (Figura 1.17) la evolución encontrada fue creciente no significativa estadísticamente, probablemente debido a la gran

variabilidad existente en los últimos años que engloban los extremos de toda la serie analizada. El análisis distribuido muestra valores nulos para cotas inferiores a los 2000 m s.n.m. (Figura 1.17.b). Se observa, para regiones con presencia de nieve, una evolución decreciente de hasta 1.3 días de pérdida con temperaturas inferiores al punto de congelación del agua al año. Las zonas de cotas inferiores a los 2000 m s.n.m. presentan valores medios nulos y tendencias ligeramente positivas en las zonas en las que la presencia de nieve es esporádica, como son las zonas de transición. La gran amplitud de la zona de estudio hace que las tendencias media en la zona, queden afectadas por estos valores de zonas bajas y no refleje realmente la tendencia en las zonas con presencia significativa de nieve.

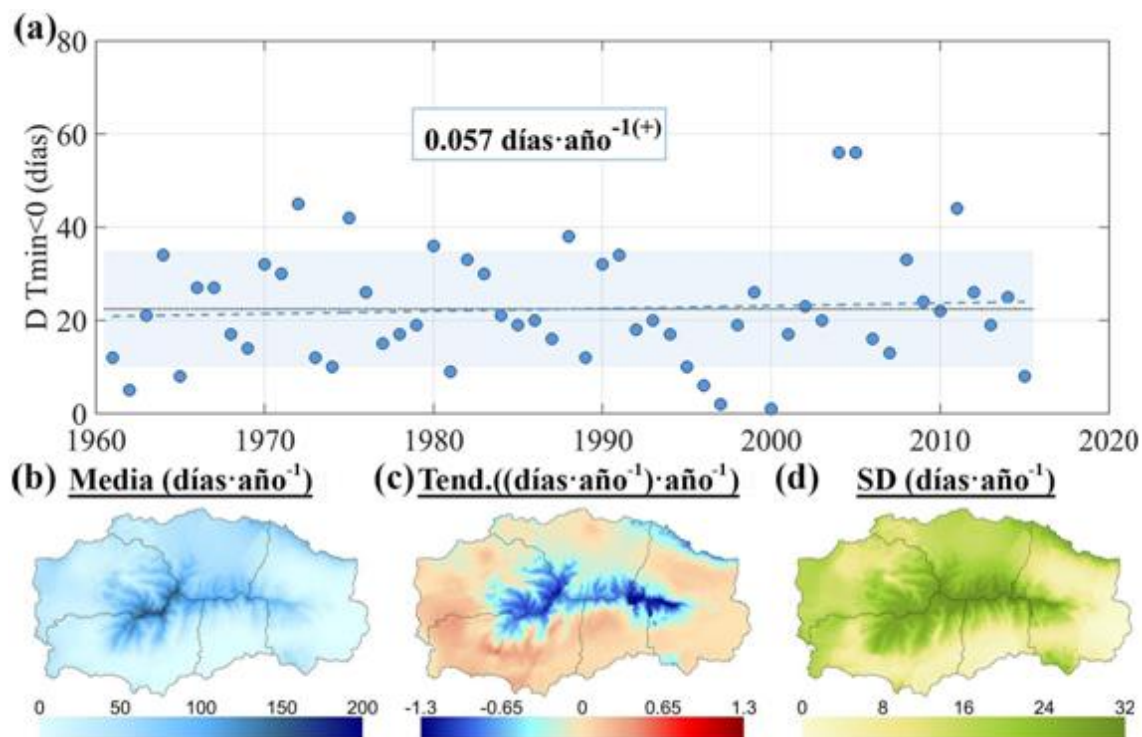


Figura 1.17 (a) Evolución del número de días con temperaturas inferiores o iguales a 0 °C anual en el periodo 1961-2015 promediada en el área de estudio: línea discontinua: tendencia de la evolución; línea continua: valor medio del periodo de estudio; área sombreada: desviación típica de la variable. (b) mapa distribuido del valor medio de DTmin (c) tendencias distribuidas en el área de estudio para DTmin (d) mapa de la desviación típica distribuida para DTmin en el periodo de estudio 1961-2015

El análisis regional realizado para estas variables (Ver Anejo B), arrojan diferentes conclusiones en función de la temperatura a analizar (tabla 1.2). En término de temperatura media, se considera la región de Andarax (R2) como la más cálida seguida de Adra (R1), cuyos valores máximos son los más extremos para todas las regiones. Dichas regiones son las que, además, muestran temperaturas mínimas superiores al resto de regiones, considerándose la región de Fardes (R3) la más fría. Finalmente, con temperaturas máximas que oscilan entre los 20.3°C y 16.95°C, Guadalfeo (R5) presenta un carácter menos cálido que las demás regiones. Sin embargo, es Fardes la que arroja temperaturas máximas superiores al resto de temperaturas. Por tanto, se considera Fardes (R3) la región cuyo rango de temperaturas es superior al resto de regiones. Siendo Guadalfeo(R5) más representativo de condiciones alpinas, seguida de Genil (R4). Finalmente, las altas temperaturas observadas para las temperaturas mínimas, caracterizan a Andarax (R2) y Adra (R1) como las más áridas térmicamente hablando, aunque sus máximas no superen a las encontradas en R3 (Fardes). En relación a las tendencias, carácter creciente significativo al 99% de confianza fue encontrado para las tres temperaturas y todas las regiones, salvo para la temperatura mínima en las regiones R1 (Adra) y R5 (Guadalfeo) situadas en la

cara sur, en la que solo presentó tendencia la R5. Para el caso del número de días con temperatura inferiores a 0 °C en la que la diversidad de tendencias se encuentra en función de la región analizada, pero coincidiendo en todas ellas en la no significancia estadística encontrada.

Tabla 1.2 Estadísticos de temperatura de cada región (Fig. zona de estudio) en el área de estudio, junto con las tendencias medias anuales obtenidas durante el periodo analizado 1961-2015. Los resultados del análisis de tendencias se definen según la prueba de Mann-Kendall como (1) significancia del $\alpha=0,01$ (**); (2) significancia del $\alpha=0,05$ (*); (3) significancia del $\alpha=0,1$ (+); o (4) sin significancia, $\alpha>0,1$ (+)

TemperaturaMedia (°C)					
	Máxima	Media	Mínima	Desviación	Tendencia
ADRA (R1)	15,60	14,01	12,55	0,66	0,02(***)
ANDARAX (R2)	15,24	14,02	12,47	0,64	0,02(***)
FARDES (R3)	14,44	13,07	11,51	0,67	0,03(***)
GENIL (R4)	14,12	12,92	11,51	0,64	0,02(***)
GUADALFEO (R5)	14,84	13,14	11,79	0,69	0,02(***)
TOTAL	14,64	13,39	11,90	0,64	0,02(***)
TemperaturaMáxima (°C)					
	Máxima	Media	Mínima	Desviación	Tendencia
ADRA (R1)	21,14	18,97	17,50	0,76	0,027(***)
ANDARAX (R2)	20,88	19,45	17,83	0,76	0,029(***)
FARDES (R3)	21,60	20,06	18,40	0,74	0,026(***)
GENIL (R4)	20,44	18,93	17,24	0,75	0,026(***)
GUADALFEO (R5)	20,30	18,46	16,95	0,79	0,027(***)
TOTAL	20,60	19,18	17,73	0,73	0,027(***)
TemperaturaMínima(°C)					
	Máxima	Media	Mínima	Desviación	Tendencia
ADRA (R1)	11,36	9,36	7,63	0,82	0,010(+)
ANDARAX (R2)	10,32	8,94	7,29	0,65	0,014(***)
FARDES (R3)	7,70	6,46	4,73	0,71	0,029(***)
GENIL (R4)	8,70	7,24	5,76	0,60	0,023(***)
GUADALFEO (R5)	9,95	8,16	6,71	0,70	0,016(**)
TOTAL	9,45	7,94	6,35	0,64	0,019(***)
Días con temperatura mínima inferior a 0 °C (días)					
	Máxima	Media	Mínima	Desviación	Tendencia
ADRA (R1)	37	9,9	0	8,9	0,09 (+)
ANDARAX (R2)	28	9,3	0	6,4	0,02 (+)
FARDES (R3)	104	50,4	12	17,8	-0,21 (+)
GENIL (R4)	80	37,5	5	16,2	-0,11 (+)
GUADALFEO (R5)	67	19,9	1	12,4	0,15(+)
TOTAL	56	22,4	1	12,2	0,05 (+)

Evolución a escala mensual

El análisis mensual, representado a escala de detalle en Anejo B, y representado en un análisis general en la Figura 1.18 destaca por la similitud de la evolución entre las temperaturas máximas, medias y mínimas a lo largo del año. Para las tres temperaturas analizadas los meses con temperaturas más frías se concentran entre diciembre y febrero, coincidiendo el mes de enero como el mes más frío del año hidrológico con medias que oscilan entre 11.19°C y 1.47°C de temperatura máxima y mínima media para todo el periodo analizado. El mes de febrero, aún siendo similar en valor medio en el régimen de temperaturas con el mes de diciembre, presenta una mayor variabilidad en los años analizados. Por el contrario, julio es el mes que reporta temperaturas más cálidas en cuanto al régimen máximo y medio. Siendo agosto, el mes más cálido analizado en cuanto a las temperaturas mínimas se refiere. Las estaciones del año son fácilmente visibles en la evolución anual. En relación a la ocurrencia, la Figura 1.18.d muestra

como el mes de enero es el 29% de los días tiene ocurrencia de temperaturas inferiores a 0 °C confirmándose así que este mes es el más frío de los analizados.

Los comportamientos observados en las tendencias son similares a los encontrados para el análisis puntual realizado (Figura 1.13) evoluciones crecientes fueron encontradas para todos los meses del año, siendo tendencias con un nivel de confianza igual o superior al 90% en los meses comprendidos entre la primavera y verano. Sin embargo, el número de días con temperaturas mínimas inferiores o iguales a 0 se encuentran evoluciones generalmente crecientes. Dicho comportamiento supondría mayor número con temperaturas bajas pero dichas temperaturas no sería extremas inferiores.

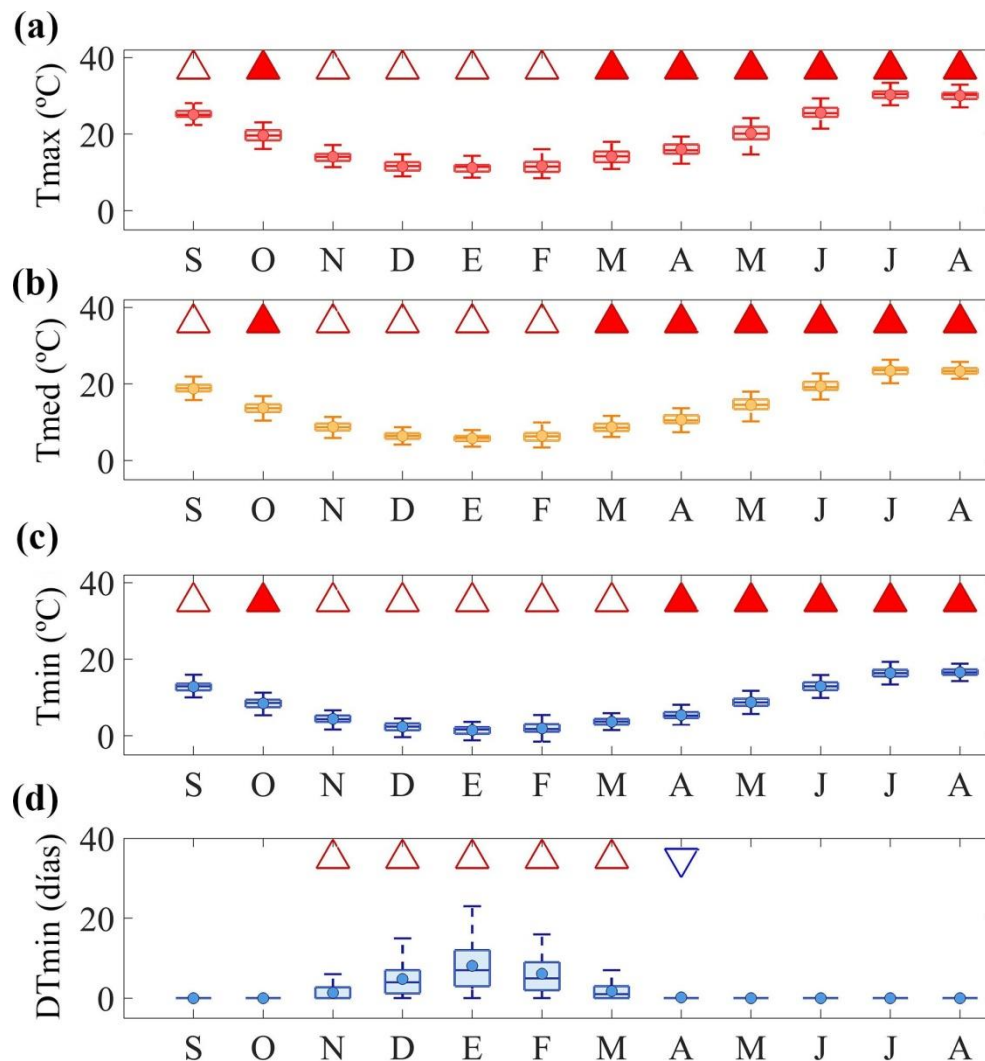


Figura 1.18 Diagrama de cajas sobre la evolución del régimen de temperaturas mensual: a) Temperatura máxima; b) Temperatura media; c) Temperatura mínima; d) Días al mes con temperatura mínima inferior o igual a 0 °C. Tendencia encontrada en cada uno de los meses del año: Triángulo rojo: tendencia creciente; Triángulo azul: tendencia decreciente. Para todos los casos, la intensidad del color refleja las estaciones tendencia estadísticamente significativa con nivel de confianza superior al 90%.

1.3.3 Análisis de tendencias del régimen de precipitación en forma de nieve.

1.3.3.1 Análisis Puntual

Este apartado analiza la evolución de la precipitación acumulada anual (Pn) para cada una de las estaciones obtenida mediante el método de la TSN. Al igual que para la precipitación y la

temperatura mínima, se analiza en este apartado la ocurrencia asociada a Pn, definida como el número de días con precipitación en forma de nieve al año (DPn).

La Figura 1.19.a y b muestran para las once estaciones en las que se tienen datos de precipitación y temperatura, la evolución de la precipitación en forma de nieve (Figura 1.19.a) y días de precipitación en forma de nieve anual (Figura 1.19.b) obtenidas mediante el método TSN obtenido por las tres temperaturas diarias observadas (máxima (Mx), media (Md), mínima (Mn)). En todas las estaciones analizadas, se obtuvo un valor nulo para las variables obtenidas mediante las temperaturas máximas y medias como umbral observándose cierta variabilidad anual, para el caso de las variables obtenidas con la temperatura mínima.

El análisis de la precipitación en forma de nieve obtenido mediante la temperatura mínima, muestra variabilidad entre estaciones en función de la altitud en la que se encuentren. Claramente, se observan mayores valores de precipitación en forma de nieve para las estaciones ubicadas en cotas altas. Destaca, que para todas ellas, existen años en los que los valores mínimos son de 0 mm de precipitación en forma de nieve y por consecuencia 0 días al año con dicha precipitación. Los valores máximos se presentan en la estación ID=61 con 1800 m s.n.m. con años que superan los 570 mm de precipitación en forma de nieve y una media en los 55 años estudiados de 18 días con precipitación en forma de nieve al año. El resto de estaciones muestran valores por debajo de 50 mm de precipitación en forma de nieve lo cual es debido a la ubicación de las estaciones analizadas, que se encuentran en su mayoría por debajo de los 1000 m s.n.m..

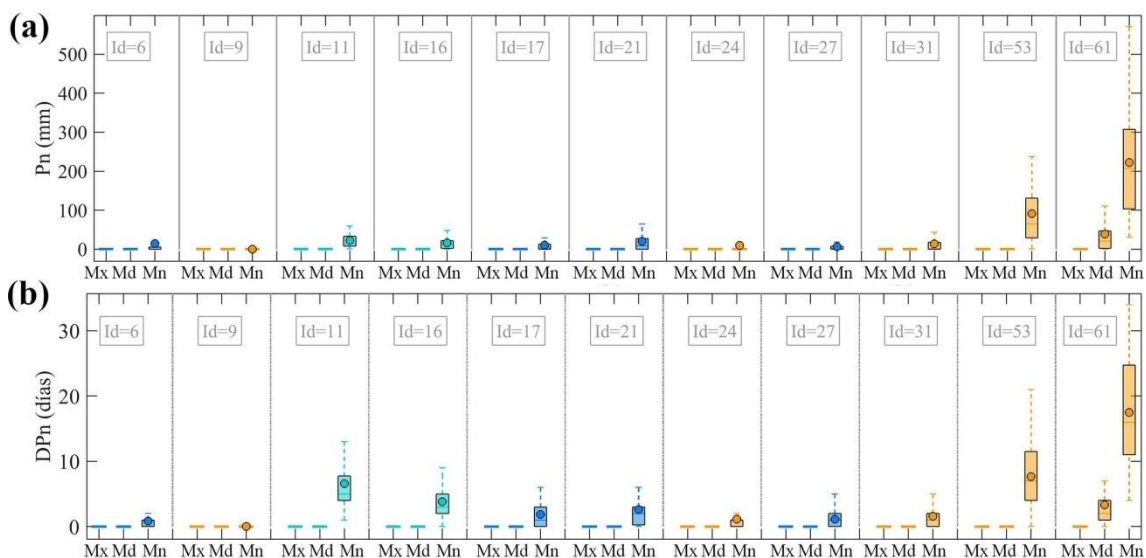


Figura 1.19 Evolución de la precipitación en forma de nieve acumulada anual (a) y el número de días con precipitación en forma de nieve anual (b) obtenidos por el método de TSN para las temperaturas máximas (Mx), medias (Md) y mínimas (Mn) observadas en cada una de las estaciones analizadas en las diferentes regiones (R1: rojo; R2: naranja; R3: verde oliva; R4: turquesa; R5: azul).

De manera independiente, el mismo análisis fue realizado en la estación PG2, en la que datos horarios de precipitación y temperatura están disponibles desde 2004. De esta manera, se pudo cuantificar la precipitación en forma de nieve a escala horaria y a escala diaria considerando como umbral las temperaturas Tmax, Tmed y Tmin diarias y asumir el error asociado a la metodología realizada a escala diaria frente a la horariaa cada una de las temperaturas umbrales. La Tabla 1.3 muestra los errores cometidos para cada una de las temperaturas umbrales utilizadas en la comparación de la precipitación en forma de nieve obtenida a escala horaria y diaria. Para los 12 años analizados, se obtiene una sobrestimación de la precipitación en forma

de nieve a escala anual del 41.85% en el caso que se utilice la temperatura mínima diaria como umbral para la aparición de precipitación en forma de nieve. Las temperaturas medias y máximas son las que suponen menos precipitación en forma de nieve de la que realmente es observada. Dichos errores, son inferiores para las tres temperaturas en los meses de invierno (diciembre-febrero) en los que la presencia de nieve y las bajas temperaturas son característicos. En relación con la ocurrencia de años húmedos y secos, tal y como era de esperar se observa un mayor error cuanto más húmedo sea el año, hecho más pronunciado para las temperaturas mínimas. En conclusión, con independencia de las escalas temporales analizadas, en la Tabla 1.3 se observa que la temperatura media es la que arroja menor error en el cálculo de la precipitación en forma de nieve como umbral a escala diaria frente al uso de un umbral a escala horaria, con un valor de -1.2%, que se considera admisible en el contexto de los métodos basados en TSN para esta determinación.

Por esta razón, se ha adaptado la temperatura media diaria de 0 °C como temperatura umbral para estimar la ocurrencia de precipitación en forma de nieve a escala diarias. No obstante, estos errores son obtenidos para una estación ubicada a 2510 m s.n.m. y la posibilidad de que el error difiera a distintas cotas no ha podido ser comprobada por la falta de disponibilidad de series largas de datos horarios observados.

Tabla 1.3 Error cometido en la estimación de la precipitación en forma de nieve por el método TNS para la escala horaria y diaria para las temperaturas Tmax, Tmed y Tmin en términos absolutos (Pnieve(mm)) y en porcentaje sobre el total para todo el periodo analizado (ε).

	Tmax	Tmed	Tmin
Pnieve (mm)	179.97	331.59	476.28
ε (%)	-46.4%	-1.2%	41.85%

1.3.3.2 Análisis distribuido

Los resultados obtenidos de los algoritmos de interpolación (Ver sección *Interpolación de las variables meteorológicas*) para el periodo de estudio comprendido entre los años 1961-2015 y el análisis del comportamiento de las de magnitud y ocurrencia de la precipitación en forma de nieve (Pn y DPn) se muestran en este apartado a diversas escalas espaciales y temporales (década, año y meses).

Evolución a escala de década

El comportamiento distribuido medio anual y los valores promedios para todo el área de estudio para la precipitación en forma de nieve y su ocurrencia en días por décadas se muestra en la Figura 1.20.

Al igual que para el régimen de precipitación (Figura 1.6), valores dispares han sido encontrados en función de la década analizada. Aunque con una evolución negativa entre las décadas analizadas, la D5 no apoya el carácter decreciente que reflejan las décadas previas a esta siendo de nuevo, la D5, la que valores más extremos muestra. La D6, aunque no está completa, vuelve a ser una década con valores decrecientes y que anticipa una década más árida en lo que nieve se refiere. El análisis distribuido espacialmente a escala temporal de década para la precipitación en forma de nieve muestra los puntos más sensibles al cambio de esta variable. Para esta, la tasa de cambio es más significativa en zonas de mayor cota sobre todo en la cara norte del Parque. Sin embargo, en zonas bajas el cambio no es significativo entre décadas.

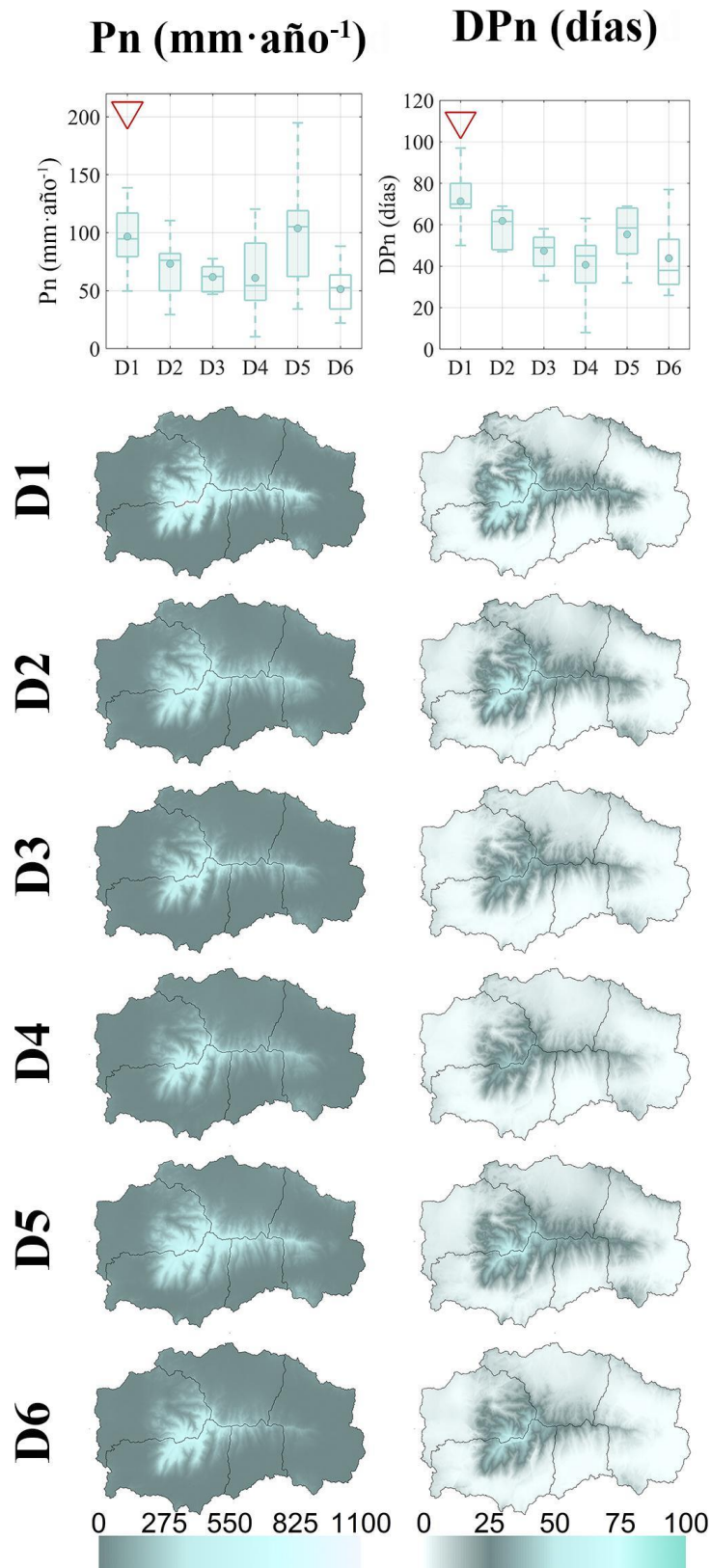


Figura 1.20 Valores distribuidos y promediados de las variables del régimen de precipitación en forma de nieve a escala de década en el periodo analizado comprendido entre 1961-2015.

En lo que a ocurrencia se refiere, destaca la D4 (1990-2000) por presentar los valores mínimos en ocurrencia de precipitación en forma de nieve. Ocurrendo en la D5 el caso contrario, cuyos valores de días con precipitación en forma de nieve son superiores en relación el número de días

con temperatura inferior a 0 °C (Figura 1.15). De esta manera, se concluye que la relación en precipitación en forma de nieve está más influenciada por los eventos de precipitación que por el régimen de temperatura. En un análisis regional de manera distribuida (Figura 1.20) como de manera promediada (Ver Anejo B), se observa como las regiones del suroeste (R1 y R2) con un menor número de días nieve y un carácter más cálido, se definen como zonas más áridas dentro del Parque. Siendo R3, R4 y R5, las que se caracterizan por un clima más montañoso. Además, siendo para el caso del número de días con precipitación en forma de nieve, las regiones que presentan una tendencia al decrecimiento más severa.

Evolución a escala anual

La Figura 1.21.a representa la evolución de la precipitación en forma de nieve obtenida a lo largo del periodo 1961-2015 y su estudio a escala anual. A lo largo de los 55 años de estudio se observa una precipitación acumulada en forma de nieve de media de 76.62 mm con una desviación típica de 35.86mm. Su tendencia, al igual que para la precipitación, es decreciente de valor $-0.209 \text{ mm} \cdot \text{año}^{-1}$. No obstante, la variabilidad en los últimos años analizados, confieren a la tendencia una no significancia estadística. Al analizar la evolución anual, se observa como es poco variable y cercano a la media en las dos primeras décadas analizadas. Sin embargo, es a partir del año hidrológico 1994-1995, en el que se alcanza el mínimo de la serie con 10.12 mm de nieve de media, en el que se observa una clara identificación de los años que han sido húmedos y secos en términos de nieve. Por ello, se concluye de manera previa, que está aumentando el carácter torrencial de la precipitación en forma de nieve.

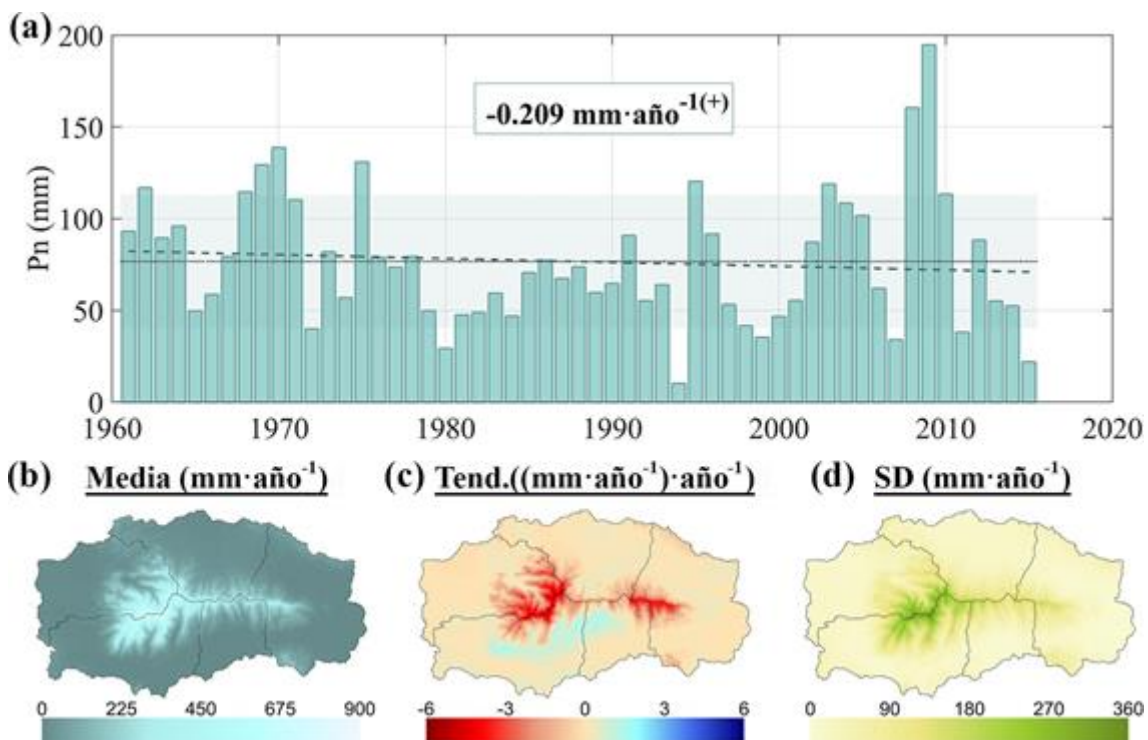


Figura 1.21 (a) Evolución de precipitación en forma de nieve anual en el periodo 1961-2015 promediada en el área de estudio: línea discontinua: tendencia de la evolución; línea continua: valor medio del periodo de estudio; área sombreada: desviación típica de la variable. (b) mapa distribuido del valor medio de Pn (c) tendencias distribuidas en el área de estudio para Pn (d) mapa de la desviación típica distribuida para la Pn en el periodo de estudio 1961-2015

El mapa de tendencias Figura 1.21.c en la precipitación anual en forma de nieve, muestra patrones combinados de las tendencias obtenidas en precipitación y temperatura. Así puede observarse como las zonas de las cumbres, zonas donde en término medio la precipitación en

forma de nieve es mayor, la pérdida de la misma también lo es. Estos valores oscilan entre los -1 mm de pérdida al año en torno a los 2000 m s.n.m. y los $-6 \text{ mm} \cdot \text{año}^{-1}$ de los picos más altos. En general en toda el área por debajo de los 2000 m s.n.m., área en la que la nieve no es predominante, se observan valores de tendencias cercanas a un comportamiento estacionario, con variaciones positivas o negativas, dependiendo de la alternancia en los años. Dentro de estas zonas bajas existen pequeñas áreas en las que las tendencias son claramente positivas. Estas zonas se localizan en las cuencas del río Guadalfeo y Adra (R5 y R1) justo por debajo de los 2000 m s.n.m. Se tratan zonas de transición en la que la alternancia de años con elevada precipitación y temperaturas mínimas bajas haga que la tendencia observada adquiera estos valores positivos.

Finalmente, los valores medios y su desviación asociada en cada uno de los píxeles analizados se presentan en la Figura 1.21.(b y d). En términos medio se observa valores superiores a los 400 mm de precipitación en forma de nieve para zonas con cotas superiores a los 2000 m.n.n.m y en la parte norte de la región del Genil (R4), concretamente la zona del Parque Natural de Sierra de Huetor, que pueden alcanzar hasta los 900 mm de precipitación en las cumbres. Por otro lado, en zonas por debajo de los 2000 m s.n.m. los valores son cercanos al valor promedio de toda la zona. En relación a la desviación típica, valores cercanos a los valores cercanos a los 300 mm en zonas de cotas altas, confieren la heterogeneidad a la que está expuesta las cumbres de Sierra Nevada y con ello la vulnerabilidad de la ocurrencia de nieve en dichas zonas.

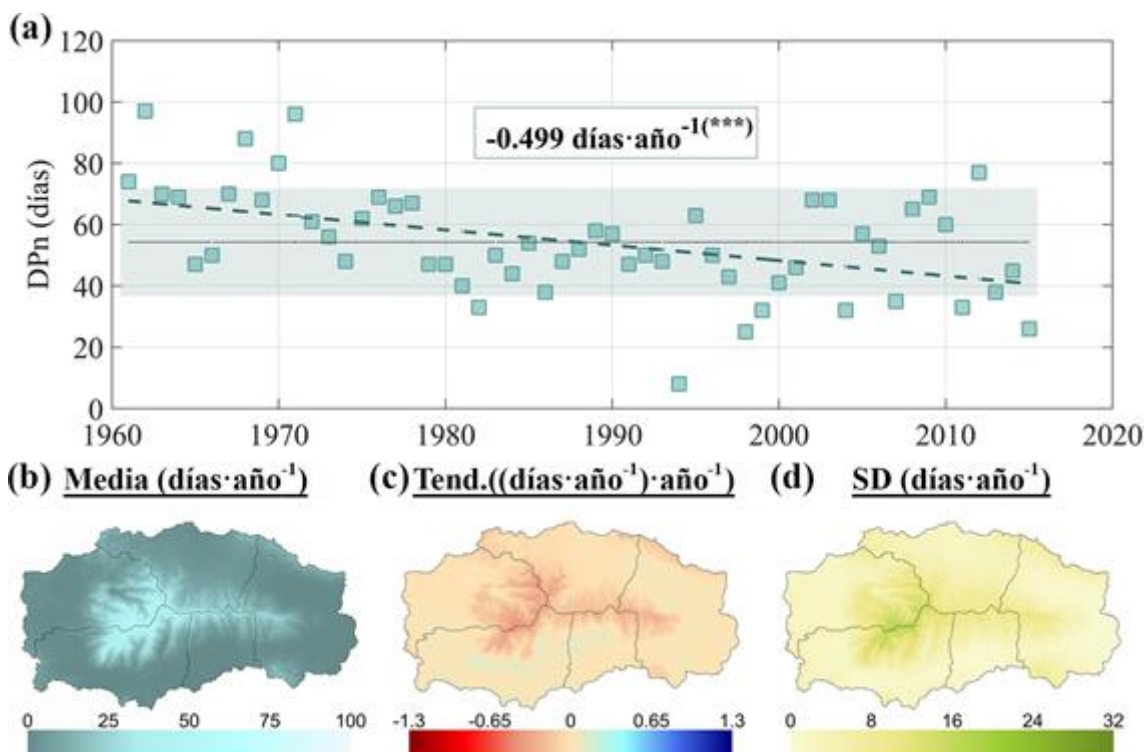


Figura 1.22 (a) Evolución del número de días con precipitación en forma de nieve anual en el periodo 1961-2015 promediada en el área de estudio; línea discontinua: tendencia de la evolución; línea continua: valor medio del periodo de estudio; área sombreada: desviación típica de la variable. (b) mapa distribuido del valor medio de Dpn (c) tendencias distribuidas en el área de estudio para la Dpn (d) mapa de la desviación típica distribuida para la Dpn en el periodo de estudio 1961-2015

Pérdidas de 0.49 días al año fueron encontradas para la ocurrencia de periodos de nieve en la zona (Figura 1.22). Al igual que para el caso de la variable DTmin (Figura 1.17) valores nulos fueron encontrados para cotas inferiores a los 2000m s.n.m. Las tendencias, muestran cómo todas las zonas con presencia de nieve experimentan un decrecimiento con valores de 0.65 días

de pérdida al año. La gran parte de las zonas bajas presentan tendencia y valores medios nulos y tendencias ligeramente positivas en zonas en las que la presencia de nieve es esporádica, como son las zonas de transición. La gran amplitud de la zona de estudio; hace que las tendencias medias en la zona, queden afectadas por estos valores de zonas bajas y no reflejen realmente la tendencia en las zonas con presencia significativa de nieve.

El análisis regional realizado (Ver Anejo B), al igual que para los valores medios distribuidos mostrados en la figura 3.b, ponen de manifiesto, con una media de 109.3 mm de precipitación en forma de nieve, el carácter alpino de la región de Guadalfeo (R5) (Tabla 1.4). Le sigue la región Genil (R4), cuyo carácter húmedo en relación a la precipitación junto con un régimen térmico por debajo de la media de la zona han sido suficientes aun tratándose de la región con altitud por debajo de la media del Parque (1270m s.n.m.). Por el contrario, de nuevo Andarax muestra su matiz árido, siendo la región que presenta menos precipitación en forma de nieve. Las tendencias para la precipitación en forma de nieve resultan variantes entre regiones. Siendo decrecientes con significancia solamente en R2 y R4 (Andarax y Genil). Cabe destacar la evolución creciente observada en la región R5 (Guadalfeo), aunque esta tendencia no arroja significancia estadística.

Tabla 1.4 Estadísticos del régimen de precipitación en forma de nieve para cada región (Fig. zona de estudio) en el área de estudio, junto con las tendencias medias anuales obtenidas durante el periodo analizado 1961-2015. Los resultados del análisis de tendencias se definen según la prueba de Mann-Kendall como (1) significancia del $\alpha=0,01$ (**); (2) significancia del $\alpha=0,05$ (*); (3) significancia del $\alpha=0,1$ (+); o (4) sin significancia, $\alpha>0,1$ (+)

Precipitación anual en forma de nieve (mm/año)					
	Máxima	Media	Mínima	Desviación	Tendencia
ADRA (R1)	188.5	64.0	6.4	36.5	-0.04(+)
ANDARAX (R2)	108.3	36.6	5.0	22.0	-0.19(*)
FARDES (R3)	175.6	65.4	9.9	31.9	-0.13(+)
GENIL (R4)	244.3	105.2	12.6	48.0	-0.59(*)
GUADALFEO (R5)	263.8	109.3	8.5	51.6	0.004(+)
TOTAL	194.8	76.6	10.1	35.8	-0.20(+)
Días al año con Precipitación en forma de nieve (días)					
	Máxima	Media	Mínima	Desviación	Tendencia
ADRA (R1)	61	36,8	7	12,6	-0.27(**)
ANDARAX (R2)	53	29,5	5	12,4	-0.34(***)
FARDES (R3)	79	46,8	7	15,3	-0.48(***)
GENIL (R4)	101	55,7	19	17,2	-0.46(***)
GUADALFEO (R5)	97	55,6	11	17,1	-0.36(**)
TOTAL	97	54,2	8	17,5	-0.49(***)

Evolución a escala mensual

Finalmente, la evolución a escala mensual se muestra en la Figura 1.23 para las variables descriptoras del régimen de magnitud y ocurrencia de la precipitación en forma de nieve. El análisis muestra que la ocurrencia de nieve se da entre los meses de octubre y abril. Una alta variabilidad es encontrada entre los meses de diciembre y febrero en los cuales existen extremos de 60 mm de precipitación en forma de nieve al mes. Siendo el mes de enero con una media de 18.6 mm el más húmedo en términos de nieve.

El carácter alpino se muestra en para Dpn entre los meses comprendidos entre noviembre y mayo. La ocurrencia de días de precipitación en forma de nieve es bastante homogénea entre los meses de diciembre y febrero.

Destaca el régimen mensual de precipitación en forma de nieve cuyas tendencias son variables en función del mes analizado. Destaca el carácter decreciente significativo del mes de diciembre, y la evolución creciente, aunque no significativa, de los meses de enero y febrero. Para el caso de diciembre, el decrecimiento de la magnitud de la precipitación en forma de nieve iría relacionado con el decrecimiento en la ocurrencia. Sin embargo, de manera significativa, destaca febrero cuya evolución en magnitud es positiva pero dicha nieve se concentra en un menor periodo de tiempo debido a carácter decreciente del número de días en los que precipita en forma de nieve. Todo esto podría suponer un aumento de la torrencialidad de la nieve en el mes de febrero.

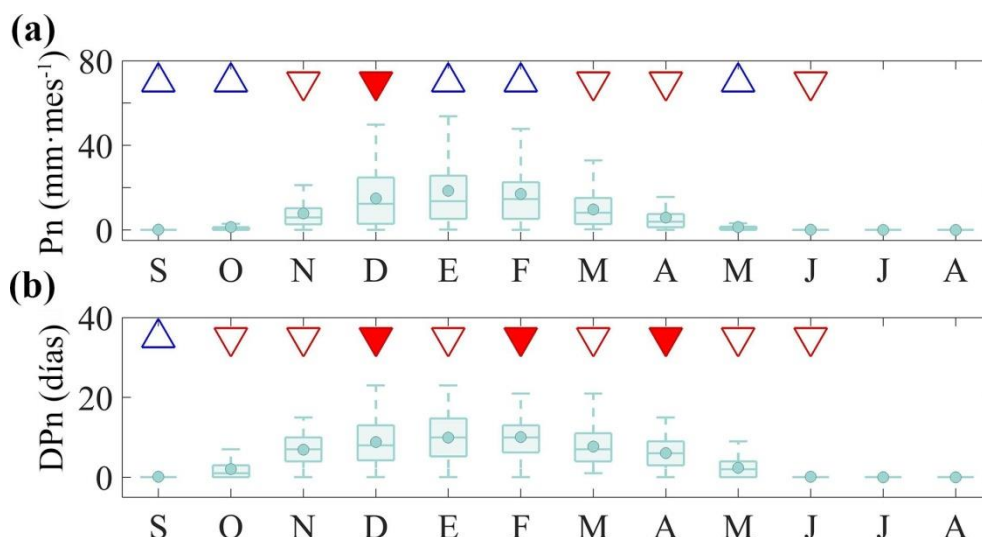


Figura 1.23 Diagrama de cajas sobre la evolución del régimen de precipitación de nieve mensual: a) Precipitación de nieve acumulada mensual; b) Dpn mensual. Tendencia encontrada en cada uno de los meses del año: Triángulo rojo: tendencia decreciente; Triángulo azul: tendencia creciente. En ambos casos, la intensidad del color refleja los meses con tendencia estadísticamente significativa con nivel de confianza superior al 90%.

1.4 Discusión

El análisis realizado para las 61 estaciones meteorológicas observadas en el periodo que comprenden 55 años de estudio proporciona una estimación de la evolución climática de las variables de precipitación y temperatura en una zona montañosa representativa de condiciones mediterránea como es el macizo de Sierra Nevada. En relación a los procesos nivosos, los resultados manifiestan la significancia del impacto de la temperatura mínima sobre la ocurrencia de precipitación en forma de nieve en las regiones mediterráneas (El Kenawy *et al.*, 2011). La falta de representatividad de estaciones en altura disponibles para este estudio ha imposibilitado el análisis puntual de la evolución de los procesos de la nieves en la zona. Por ello, los resultados puntuales son complementados con un análisis distribuido en la zona de estudio obtenido mediante interpolación.

La Figura 1.24, resume la ocurrencia de tendencias encontradas en las tres escalas temporales analizadas (década, año y mes) para cada una de las estaciones meteorológicas seleccionadas en el área de estudio para las variables de precipitación y temperatura media, y sus asociadas en ocurrencia en el tiempo que son el número de días con al año con precipitación cuya temperatura mínima es inferior a 0°C . La figura muestra los resultados ordenados por regiones y a su vez por altitud en la que se encuentran. Temporalmente, las tres escalas analizadas aportan conclusiones útiles en el estudio de las tendencias meteorológicas puntuales y

distribuidas. En general, la agregación de las variables en escalas temporales amplias se asocian con tendencias no significativas. Aunque el carácter de la tendencia es similar para todas las escalas analizadas, matices diferentes son encontrados en las tendencias mensuales en comparación con las tendencias anuales o de décadas.

En relación a la precipitación anual, se observan tendencias decrecientes a escala de década y global en todas las regiones, con mayor nivel de significancia (5%) en las regiones norte y noroeste en la zona de estudio (R3-R4-R5). Esto coincide con la evolución habitualmente encontrada en zonas con clima mediterráneo, si bien la significancia de la tendencia presenta una variabilidad elevada según los casos. Aunque algunos trabajos en otras cuencas mediterráneas muestran esta evolución decreciente durante un periodo histórico similar sin arrojar resultados significativos a un nivel de confianza superior o igual al 90% (e.g. Chaouche *et al.*, 2010; Folton *et al.*, 2019), un análisis más generalizado recoge tendencias significativas decrecientes con nivel de confianza superior o igual al 95% de forma media en la zona occidental y central de la región mediterránea (Philandras *et al.*, 2015) para el periodo 1951-2010, no significativas en la región oriental. Sin embargo a escala puntual los resultados de este trabajo muestran la gran variabilidad encontrada entre estaciones puntuales a lo largo de toda la región, si bien con dominancia clara de una evolución decreciente de la precipitación anual. En la zona de estudio, a escala puntual destaca el carácter creciente significativo de las estaciones ubicadas en las regiones centrales en ambas caras de Sierra Nevada (R1 y R3). Sin embargo, dichas regiones están menos representadas a escala puntual y sus tendencias distribuidas están interferidas en mayor grado por la interpolación de estaciones cercanas pero fuera de los contornos de la región. La escala mensual aporta una clara tendencia a la alza en los meses de septiembre y un claro decrecimiento de las mismas en el mes de junio. Esto puede asociarse con una distribución temporal variante de las precipitaciones que pueden asociarse con un mayor número periodos de depresión aislada en niveles altos (DANA), referidos en otras zonas de la región mediterránea (Ulrich *et al.*, 2012). La distribución temporal de las precipitaciones se muestra mediante el número de días con precipitación (Figura 1.8) y su evolución a escala de década resulta significativa (Figura 1.6). Sin embargo a escala puntual, se observa cómo dicha tendencia decreciente es clara en la cara norte de la sierra, pero por el contrario es variable en las estaciones ubicadas en la cara sur.

Se puede observar fácilmente cómo las tendencias por décadas y años en temperatura media (Figura 1.24.c) aumentan significativamente para la mayoría de las estaciones meteorológicas. Sin embargo, dicho comportamiento solo se refleja para los meses que abarcan la primavera y el verano. Los meses centrales de invierno presentan un carácter decreciente no significativo salvo para el mes de diciembre y las estaciones ubicadas en cotas altas de la R2.

En relación a la ocurrencia de la temperatura umbral, el número de días con temperaturas mínimas inferiores a 0 °C (Figura 1.24.d) muestra una tendencia variable entre escalas temporales, regiones y cotas en las que se encuentran las estaciones que no muestra una relación clara con las tendencias obtenidas en temperaturas medias. Solo destacan las estaciones ubicadas en cotas superiores a los 1200 m s.n.m. de la R2 por su carácter significativo decreciente en todas las escalas y meses analizados.

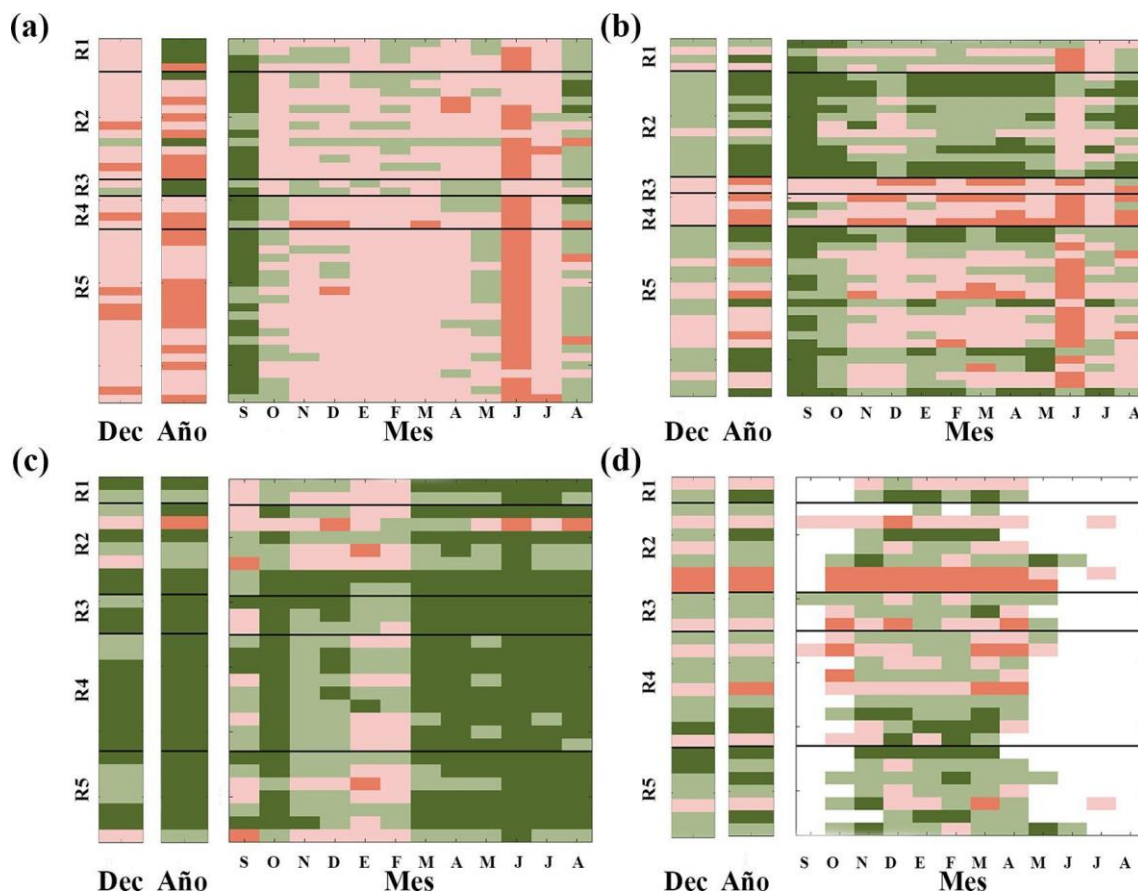


Figura 1.24 Ocurrencia de tendencias a escala de década, año y meses observadas para las variables analizadas en las estaciones disponibles en cada región delimitada en este estudio (R1 a R5): a) Precipitación mensual; b) Días al mes con precipitación; c) Temperatura media diaria mensual; d) Días al mes con temperatura mínima diaria inferior a 0 °C. Verde: tendencia creciente; Salmón: tendencia decreciente. La intensidad del color se asocia a tendencias estadísticamente significativas con nivel de confianza superior al 90%.

Los resultados distribuidos han servido para realizar una zonificación meteorológica de las principales cabeceras de los ríos de Sierra Nevada en relación a la influencia de la nieve. La Figura 1.25 muestra el valor medio y tendencias anuales distribuidas por regiones para todo el periodo de estudio de las variables de este capítulo. Tendencias crecientes en temperaturas han sido observadas para todas las regiones y temperaturas analizadas. La ocurrencia de días con temperaturas inferiores a los 0 °C han arrojado una evolución creciente para la R1 y R5, y decreciente para el resto de regiones. No aportando tendencia significativa ninguna de ellas. Las regiones R2 y R5 se definen como las más cálidas y frías en término medio, aún siendo la R3 la que aporta un régimen de temperaturas extremo. El régimen de precipitación viene dado por tendencias decrecientes para todas las regiones, las cuales se asocian con evoluciones decrecientes de la precipitación en forma de nieve. En términos de magnitud, se define R4 (Genil) como la región más húmeda en términos de precipitación. No obstante, la R5 (Guadafeo) es la más representativa de condiciones alpinas (alta montaña) en régimen térmico durante la estación de nieve, seguida de R4 y R3 (Genil y Fardes), y alternando R4 y R1 (Genil y Adra) en término de precipitación. R2 (Andarax) se identifica como la más representativa de condiciones semiáridas, seguida por R3 (Fardes) en régimen de precipitación y R1 (Adra) en régimen de temperaturas. La ocurrencia conjunta de precipitación y temperaturas inferiores a 0°C condiciona el régimen de precipitación en forma de nieve, con las regiones occidentales R5 (Guadafeo) y R4 (Genil) como aquellas con mayor precipitación anual en forma de nieve, que se produce durante un mayor número de días en R5 seguida por R4. En el extremo opuesto, la región más oriental, R2 (Andarax), muestra la menor influencia de la nieve en toda la zona de

estudio, tanto en cantidad como en ocurrencia, como es de esperar por su menor cota en el contexto de la zona de estudio.

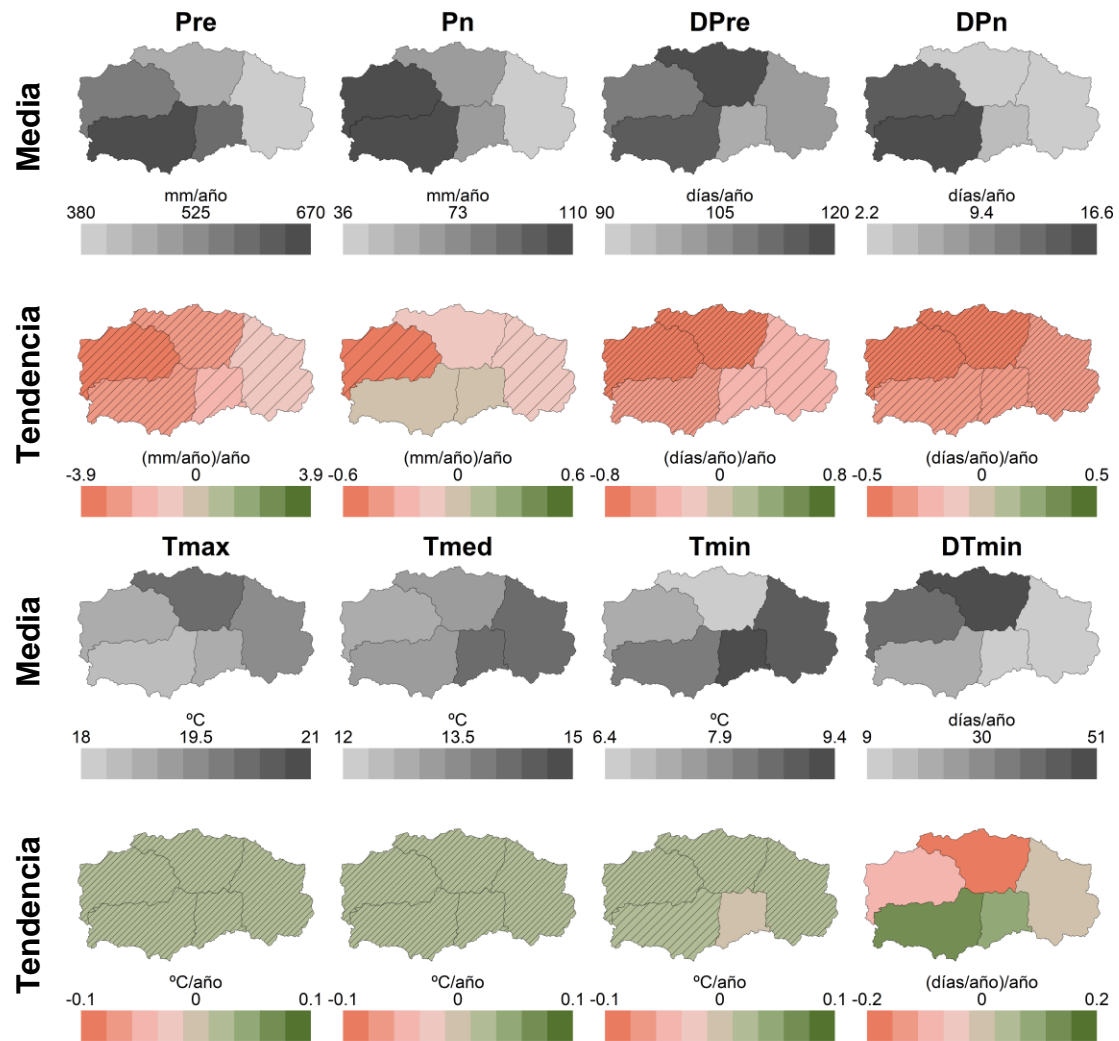


Figura 1.25 Distribución regional en Sierra Nevada de los valores medios anuales de las variables analizadas junto con sus tendencias (las líneas oblicuas indican significancia con nivel de confianza igual, o superior más rayado, al 90%) durante el periodo de referencia (1961-2015).

Las limitaciones de los resultados obtenidos mediante las observaciones meteorológicas discutidos anteriormente se asocian con la heterogeneidad en la distribución de las estaciones meteorológicas analizadas, el limitado número de estaciones con datos históricos de calidad disponibles y la extensa área analizada. Además, la topografía abrupta en el área de estudio junto con la influencia de las condiciones en la costa mediterránea, fundamentalmente en la vertiente sur de Sierra Nevada, requiere conocer el régimen climático en zonas con cota elevada, donde la precipitación anual es elevada y el gradiente térmico es observado. Dichas cotas no están representadas con series históricas de datos y su evolución a largo plazo no puede aproximarse mediante observaciones directas. Por todo ello, el estudio distribuido es la respuesta al objetivo de conocer la evolución y tendencias históricas en las variables meteorológicas en la zona.

De los resultados distribuidos se constatan algunas diferencias relevantes entre las tendencias obtenidas a escala global en la zona de estudio o regional frente a aquellas a escala local no ya en magnitud, algo esperable, sino en sentido y/o significancia. Por ejemplo, si bien las tendencias crecientes obtenidas para el valor promedio en toda la zona de Sierra Nevada de las temperaturas máxima, media y mínima diaria medias anuales son significativas con un nivel de confianza del 99%, cuando se analizan la distribución espacial de dichas tendencias se encuentran valores decrecientes para la temperatura mínima diaria en algunos puntos de la zona de estudio, y el nivel de confianza de la tendencia desciende al 95% (R5) o es inferior al 90% (R1) en las regiones sur. Esto es relevante en función de qué impactos asociados a las tendencias resultantes quieran estudiarse: en el análisis de la dinámica de la nieve y su persistencia, el análisis distribuido es imprescindible para identificar los impactos en la zona con mayor dominancia de la nieve; para analizar los impactos hidrológicos, no obstante, la escala regional permite comparar las distintas cabeceras de cuenca en la zona de estudio y establecer similitudes y divergencias entre ellas.

A pesar de la tendencia decreciente generalizada de la precipitación anual en toda la zona a escala de regiones, la precipitación anual en forma de nieve no muestra tendencia ni evolución clara en las regiones sur en Sierra Nevada y sí presenta tendencia decreciente en el resto aunque con nivel de confianza del 90% solo en las regiones extremas oeste (R4) y este (R2). Sin embargo, el número anual de días con precipitación en forma de nieve sí arroja una tendencia significativa en todas las regiones con nivel de confianza al menos del 95% que llega al 99% en las dos regiones norte. La pérdida media de precipitación en forma de nieve anual a escala global en la zona de estudio se estima en un 0.26% al año durante el periodo de estudio (1961-2015); este valor está en consonancia con los encontrados en otras partes del mundo, aunque con diferencias locales. Por ejemplo, Kunkel et al. (2009) presentan una pérdida media del 0.19% anual durante el periodo 1930-2007 en un análisis de más de 400 estaciones distribuidas a lo largo de Estados Unidos, con tendencias decrecientes solo en el 57% de las mismas.

Así, cabe señalar la aparente redistribución de la precipitación en forma de nieve a escala global durante el periodo de estudio en las regiones con mayor importancia de la misma, con pérdidas anuales tanto de magnitud como de días en las zonas más elevadas y aumentos de magnitud en bandas de cota intermedia; diversos trabajos indican tendencias medias anuales crecientes de la precipitación en forma de nieve en ciertas localizaciones en el mundo para periodos de 30-50 años, como el oeste de Estados Unidos y México (Knowles *et al.*, 2006; Wi *et al.*, 2012), pero siempre asociados a las bandas de cota más altas a una latitud dada. La falta de observaciones directas de precipitación y temperatura en las zonas más altas de las regiones de Sierra Nevada ya mencionada podría estar detrás de este comportamiento, si bien no parece esperable que altere el signo de las tendencias obtenidas. Este comportamiento presenta además diferencias entre la vertiente sur y norte, ya que en la primera esta redistribución compensa los volúmenes de nieve perdidos y ganados (tendencia nula no significativa en las regiones R5 y R1) entre bandas de cota e incluso aumenta el número de días con nevadas en las bandas intermedias, mientras que en las regiones norte (R4 y R3) la ganancia en cotas inferiores es inferior a la pérdida en altura con un menor incremento de días con nevadas en ellas. Esto es especialmente relevante si se considera que la pérdida de precipitación a escala global es significativa en todas las regiones e impacta, por tanto, de forma diferente en el régimen hidrológico de las cuencas en las que se engloban estas zonas de cabecera. Asimismo, la pérdida de nieve en la región más oriental (R2), con la menor influencia de cotas elevadas en la zona de

estudio, es muy acusada e incluso del mismo orden de magnitud que la obtenida para las cumbres más altas de Sierra Nevada.

Por último, a pesar de las tendencias claras hacia un menor número de días al año con ocurrencia de precipitación, y de precipitación en forma de nieve en la zona de estudio, la tendencia generalizada de pérdida de precipitación anual de forma significativa en todas las regiones no está siempre acompañada de una pérdida de precipitación anual en forma de nieve, ni tampoco de forma significativa. Las regiones sur de Sierra Nevada presentan un valor nulo de tendencia, no significativo a un nivel de confianza del 90%, y solo se alcanza esta significancia para la pérdida de nieve en las regiones extremas oeste y este de la zona. El estudio conjunto de la temporalidad y la magnitud de la precipitación en forma de nieve abordado en el capítulo 2 aborda el análisis de la torrencialidad y aridez del régimen de la nieve en la zona de estudio y presenta sus tendencias a las escalas definidas en este trabajo.

1.5 . Conclusiones

Se ha realizado un análisis de tendencias del régimen de precipitación en forma de nieve en las cabeceras de las cuencas en Sierra Nevada, como zona representativa de entornos de alta montaña en regiones de clima mediterráneo, durante el periodo histórico 1961-2015. Los resultados muestran la gran variabilidad del régimen anual de precipitación y temperatura, y de la precipitación en forma de nieve, a escala decenal y anual, así como estacional, tanto a escala local como a escala de las regiones delimitadas en este estudio, y suponen el primer estudio sobre tendencias históricas realizado de forma multi-escala con una elevada resolución espacial. Las tendencias obtenidas permiten resumir las principales conclusiones:

- La precipitación anual y la temperatura media anual en la zona de estudio están experimentando una tendencia global decreciente y creciente, respectivamente, estimada en -2.3 mm/año y -0.02 °C/año como media en 55 años, tendencia que se confirma en el análisis por regiones efectuado, con diferencias locales en valor y en significancia.
- Los valores medios anuales de la temperatura máxima y mínima diarias muestran asimismo una tendencia global creciente significativa para dicho periodo, con valores similares en magnitud. No obstante, los valores mínimos absolutos a escala anual sufren una tendencia decreciente significativa a escala local en numerosas zonas de Sierra Nevada. Por otra parte, el número de días al año con temperatura mínima inferior a 0°C experimenta una tendencia aparente (no significativa a un nivel de confianza del 90%) creciente en las regiones sur y decreciente en las regiones norte, con un valor medio a escala global positivo aunque muy bajo.
- Estos cambios conllevan una disminución aparente en la precipitación anual en forma de nieve (-0.20 mm/año como media en 55 años) y en el número de días al año con ocurrencia de nieve en la zona de estudio (-0.06 días/año como media en 55 años).
- El cambio observado durante este periodo en la ocurrencia de precipitación en forma de nieve está más relacionado con la tendencia observada en el régimen de precipitación anual que con la tendencia asociada al régimen térmico, si bien este condiciona, una vez iniciada, la forma de la precipitación.
- La variabilidad anual es muy elevada para las variables climáticas analizadas y se requieren series extensas, de al menos tres décadas pero preferiblemente cinco, para poder efectuar un análisis a escala decenal.

- El análisis decenal de las variables seleccionadas apunta a un incremento de la torrencialidad en el régimen de precipitación y de precipitación en forma de nieve.
- El análisis mensual aporta una pérdida generalizada de precipitación a lo largo del año, a excepción del final del verano, únicamente con tendencia significativa creciente para la precipitación acumulada en septiembre y decreciente para la correspondiente a junio, con pérdida de días con precipitación todos los meses salvo en septiembre, que solo es significativa al final del otoño y principio de primavera. En general, el régimen de temperatura a todas las escalas experimenta tendencia significativa creciente.
- Sin embargo, a escala mensual no se aprecian tendencias significativas con un mínimo de nivel de confianza del 90% para la precipitación en forma de nieve, a excepción del mes de diciembre, con tendencia decreciente. En general, se aprecia cierta redistribución temporal del régimen a lo largo del año: la nieve tiende a acumularse en los meses de invierno y sufre pérdidas en primavera, si bien se observa una tendencia aparente (no significativa) a producirse nevadas aisladas en meses fuera de la estación típica, esto es, septiembre-octubre o incluso en mayo. Sin embargo, el número de días al mes con precipitación en forma de nieve disminuye en todos los casos, salvo en septiembre; la tendencia es significativa con un nivel de confianza del 90% en diciembre, febrero y abril.
- La zonificación efectuada identifica las cabeceras de las cuencas del río Guadalfeo y del río Andarax (regiones R5 y R2 en este trabajo) como las zonas opuestas de comportamiento extremo en cuanto a la presencia de la nieve y condiciones de aridez en el entorno de Sierra Nevada, respectivamente, desde un punto de vista del impacto hidrológico de la nieve.
- El análisis espacial de las tendencias observadas en 55 años sitúa el área del PNSN en la zona más sensible a las tendencias observadas, con la cabecera del Genil siendo la región donde la pérdida de precipitación anual en forma de nieve es más intensa y los cambios en su temporalidad se dirigen hacia un régimen más árido.

Como resumen, además de quedar patente el no paralelismo generalizado entre las tendencias del régimen de precipitación y las del régimen de precipitación en forma de nieve, las conclusiones en Sierra Nevada apuntan a una mayor torrencialidad de la precipitación en forma de nieve a todas las escalas, entendida esta torrencialidad como su concentración en determinados periodos del año (escala estacional), determinados años (escala anual) y algunas décadas (escala decenal), junto con una aparente aridificación de algunas regiones, en especial algunas zonas en las mismas.

Por último, los resultados muestran cómo el sistema Sierra Nevada incluye diferentes “nivo-tipos” en cuanto al régimen de precipitación en forma de nieve, influenciados por la interacción de las dos direcciones muy marcadas de gradientes más allá de los topográficos, es decir, a escala de las regiones: norte-sur, sin y con influencia de la proximidad del mar y del clima subtropical de la costa mediterránea en esta zona (entre otros procesos), y oeste-este, con influencia decreciente de las borrascas atlánticas (entre otros procesos también). Cualquier análisis a escala global del sistema Sierra Nevada, esto es, trabajar con los valores medios de los descriptores principales del régimen climático asociado a la nieve, puede llevar a conclusiones muy diferentes sobre los mismos a escala de regiones-cuenca o local, con evidente sesgo si se trabaja únicamente con un número limitado de estaciones ubicadas en una misma zona.

La ausencia de estaciones meteorológicas con series de duración suficiente limita la calidad de la representación espacial de las variables analizadas en las zonas más elevadas de Sierra

Nevada; no obstante, la metodología seguida ha arrojado resultados coherentes con el régimen observado en la zona de estudio para periodos más recientes presentado en otros trabajos y permite sentar las bases para el seguimiento del impacto del calentamiento global en este emplazamiento singular entre las zonas de montaña y su transferencia a otras regiones mediterráneas y semiáridas en el planeta.

CAPÍTULO 2: Índices de torrencialidad y aridez relacionados con el régimen de la nieve en Sierra Nevada

2.1 Introducción

Las zonas montañosas de las regiones mediterráneas son muy vulnerables al calentamiento global debido a los impactos sobre la nieve ocurrencia y persistencia. una de las principales características del clima mediterráneo es la irregularidad de la distribución temporal de las precipitaciones a lo largo del año (Cortesi *et al.*, 2012; Romero *et al.*, 1998 y 1999), siendo prácticamente nulas en las épocas de estío o con carácter torrencial (Kottek *et al.*, 2006). Diferentes trabajos destacan el cambio observado en el régimen fluvial en las zonas de influencia de la nieve (Barnett *et al.*, 2005; Bale *et al.*, 2006) especialmente durante la fase de recesión estival (Rauscher *et al.*, 2008; Cayan *et al.*, 2007). La sequía y la aridez se han analizado ampliamente en términos del régimen de precipitación (Martin-Vide, 2004; Benhamrouche y Martin-Vide, 2011 y 2012; Cortesi *et al.*, 2012; Coscarelli and Caloiero, 2012), pero se ha hecho menos esfuerzo para caracterizar la torrencialidad y la aridez en las áreas con presencia de nieve.

Tras analizar los resultados del capítulo previo donde se ha cuantificado el orden de magnitud de los cambios observados en las variables meteorológicas, los resultados apuntan a una redistribución espaciotemporal de la ocurrencia de nieve y su volumen. Por este motivo, este capítulo tiene como objetivo principal evaluar la torrencialidad de las tendencias observadas en la dinámica meteorológica y de la nieve y sus condiciones de aridez en el Parque Nacional y Natural de Sierra Nevada y sus cuencas asociadas. Para ello, se identificaron índices de torrencialidad y aridez referidos a la precipitación y nieve y se analizó el impacto de las tendencias obtenidas.

2.2 Metodología

Para analizar la torrencialidad y aridez en la zona de estudio se utilizan índices, previamente definidos en la literatura científica o específicamente definidos en este trabajo. Todos ellos se obtienen a partir de las series de datos meteorológicos disponibles y los resultados generados en el Capítulo 1. Estos índices caracterizan los regímenes de temperatura y precipitación (índices asociados a la precipitación) y regímenes de temperatura y precipitación en forma de nieve (índices asociados a la precipitación en forma de nieve) en el área. 16 índices son definidos, 8 en cada grupo:

Asociados a la precipitación:

- **Índice días sin precipitación (Dsp):** número de días al año con precipitación igual o inferior a 0.1 mm.
- **Índice de aridez (IAp):** relación entre la precipitación anual (Pre) y la temperatura media anual (Tmed) (Lang, 1920; un mayor valor indica menor grado de aridez y viceversa)
- **Índice de torrencialidad de la precipitación (ITp):** día del año hidrológico (1 de septiembre a 31 de agosto) en el que se acumula un umbral determinado (10%, 50%, 75%, 90%, 95%, 99%) de la precipitación anual.

- **Índice de intensidad de precipitación (Ip):** relación entre la precipitación anual (Pre) y el número de días al año con precipitación ($D_{pre}=365-D_{sp}$).
- **Índice de sequía (ISp):** máximo número de días consecutivos sin precipitación.
- **Índice de temperatura (ITs):** temperatura media asociada al evento que define ISp.
- **Índice de humedad (IHp):** máximo número de días consecutivos con precipitación.
- **Índice Intensidad asociada a IH (IIHp):** intensidad media de precipitación asociada al evento que define IHp.

Asociados a la precipitación en forma de nieve:

- **Índice días sin precipitación en forma de nieve (Dsn):** número de días al año en el que la precipitación en forma de nieve es igual o inferior a 0.1 mm.
- **Índice de aridez de la nieve (IAN):** relación entre la precipitación de nieve acumulada anual (Pn) y la temperatura media anual (Tmed); (a partir de Lang, 1920; un mayor valor indica menor grado de aridez y viceversa)
- **Índice de torrencialidad de la nieve (ITn):** día del año hidrológico en el que se supera umbrales (10%, 50%, 75%, 90%, 95%, 99%) de la precipitación en forma de nieve acumulada anual.
- **Índice de intensidad de nieve (In):** relación existente entre la precipitación de nieve acumulada anual (Pre) y el número de días al año con precipitación en forma de nieve (Dpn).
- **Índice de sequía de la nieve (ISn):** máximo número de días consecutivos sin precipitación en forma de nieve
- **Índice de temperatura (ITs):** temperatura media asociada al evento ISn.
- **Índice de humedad (IHn):** máximo número de días consecutivos con precipitación en forma de nieve
- **Índice asociada a IHn (IIHn):** intensidad asociada a IHn.

Los índices definidos pueden clasificarse según la escala temporal que representan: escala media, en la que se analizan torrencialidad y aridez a lo largo de un periodo, en este caso un año, y escala de evento, en la que se caracteriza el evento más seco y más húmedo acontecido en la escala media. La Tabla 2.1 muestra esta clasificación, para los índices genéricos sin particularizar si se obtienen con precipitación o precipitación en forma de nieve.

Tabla 2.1 Tabla resumen de los índices definidos clasificados en función de su objeto en este estudio.

Escala Media		
	ARIDEZ	TORRENCIALIDAD
Persistencia	(1) Índice días sin precipitación (Ds)	(3) Índice de torrencialidad de la precipitación (IT)
Magnitud	(2) Índice de aridez (IA)	(4) Índice de intensidad (I)
Escala Evento		
	SECO	HÚMEDO
Persistencia	Índice de sequía (IS)	Índice de Humedad (IH)
Magnitud	Índice de temperatura (IT)	Intensidad asociada a IH (IIH)

Al igual que el Capítulo 1, el análisis se realiza para 55 años (1961-2015) a distintas escalas espaciales y temporales. En el caso de la escala temporal, se realiza tanto a escala anual como de década, mostrando para esta última las distribuciones de los valores anuales medios correspondientes a cada década analizada. Para la escala espacial la selección viene condicionada por dos factores, la disponibilidad de datos y la representatividad del índice en cuestión a dicha escala. La Tabla 2.2 resume los índices definidos en las distintas escalas espaciales en las que se analizan; la escala puntual o distribuida hace referencia a los valores calculados con las observaciones registradas en las estaciones meteorológicas utilizadas en este estudio (solo para los índices de precipitación ya que no hay ninguna estación histórica con registros simultáneos de precipitación y temperatura) o a partir de la interpolación espacial efectuada previamente (ver Capítulo 1), respectivamente (con resolución espacial de 30 x 30 m, por regiones o a escala global en toda la zona de estudio). La evolución temporal y los estadísticos principales de cada índice se han calculado para cada una de las escalas espaciotemporales de las que son representativos en este trabajo. La detección de tendencias estadísticas se realiza mediante el test de Mann-Kendall (Gibbons y Chakraborti, 2010).

Tabla 2.2 Tabla resumen de los índices definidos, en las distintas escalas espaciales (puntual o distribuido) en las que se va a mostrar y analizar en este capítulo.

INDICADORES	PUNTUAL	DISTRIBUIDO	
		regiones/global	30 m x 30 m
PRECIPITACIÓN			
ITp			
Dsp			
IAp			
Ip			
ISp			
IHp			
IT			
IIHp			
PREC. NIEVE			
ITn			
Dsn			
IAn			
In			
ISn			
IHn			
IT			
IIHn			

Por último, partiendo de las conclusiones del capítulo anterior, para la escala puntual se incluye únicamente el análisis en las estaciones localizadas en las regiones R2 (Andarax) y R5 (Guadalfeo), por tratarse de las regiones opuestas representativas de los extremos encontrados en la zona de estudio en el eje oeste-este, además de concentrar un mayor número de estaciones, 21 y 13 respectivamente, que cubren un mayor intervalo de cota (130-1800 m s.n.m.).

2.3 Resultados

2.3.1 Obtenidos con la precipitación

2.3.1.1 Escala media

Índice días sin precipitación (Dsp)

Escala Puntual

La evolución del número de días al año sin precipitación en las regiones R2 y R5, para el periodo de estudio 1961-2015, se muestra en este apartado. Las Figura 2.1 a y b. representan los valores medios, máximos, mínimos y cuartiles de la distribución del índice D_{sp} en las estaciones disponibles en ambas regiones. Estos gráficos, ayudan a estimar la evolución que presenta cada uno de los puntos de control. En ambas se observa la diferencia entre las regiones, siendo R2 más característica por tener un mayor número de días sin precipitación. Para esta región el caso más favorable con un 73.7% de los días al año sin precipitación (269 días de valor mínimo observado) frente al 54.8% para la R5 (200 días de valor mínimo). Por otro lado, R5 (Figura 2.1 a) se observa una mayor variabilidad, existiendo en todos los intervalos de cota alguna estación con tendencia creciente para este índice, si bien para aquellas estaciones por encima de los 1500 m s.n.m. estas tendencias no son significativas. R2 presenta una disminución generalizada del valor del índice con independencia de la banda de cota analizada, así como una menor variabilidad local.

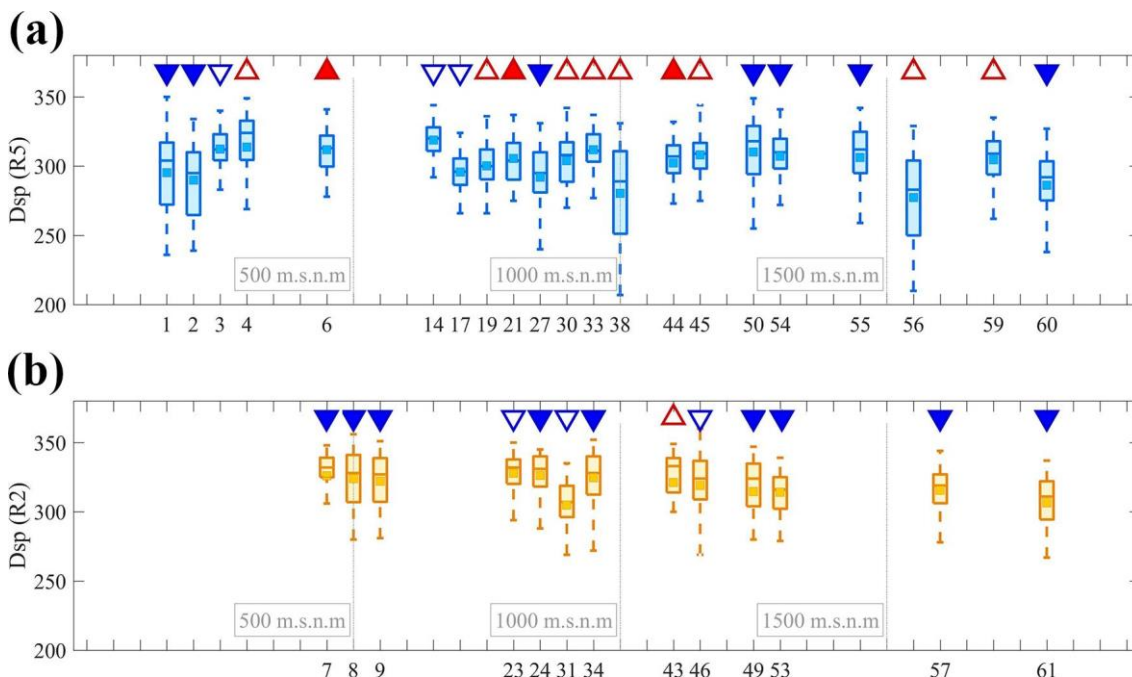


Figura 2.1 Evolución del índice Dsp para el periodo 1961-2015 en las regiones R2 y R5. b) Diagrama de cajas de las estaciones de la R5. c) Diagrama de cajas de las estaciones de la R2 (representadas en orden creciente de cota). Tendencia encontrada en cada uno de las estaciones a escala anual: Triángulo vértice hacia arriba (rojo): tendencia creciente; Triángulo vértice hacia abajo (azul): tendencia decreciente. En ambos casos, la intensidad del color refleja las estaciones con tendencia estadísticamente significativa superior al 90% de confianza.

Escala Distribuida

La evolución de Dsp para el periodo analizado en la zona de estudio se muestra en la figura 2.2. El número de días sin precipitación varía de media entre 250 y 263 para las regiones ya

definidas como representativas de los climas áridos y de montaña (R2 y R5) y muestra una evolución similar entre regiones con, en todos los casos, una elevada variabilidad anual. Para todas las regiones, se observa una tendencia creciente que es significativa en las zonas con un régimen más húmedo de precipitación (R3, R4 y R5). Destaca la R2 en la que como mínimo el 60% del año está sin precipitaciones. La escala de década muestra la tendencia de pérdida de días de precipitación desde la D1 a la D4, siendo la D5 para todas las regiones la década más homogénea al cambio y que ofrece un menor número de días sin precipitación. La D6, aunque no completa, parece recuperar la tendencia creciente observada en las décadas precedentes a la D5.

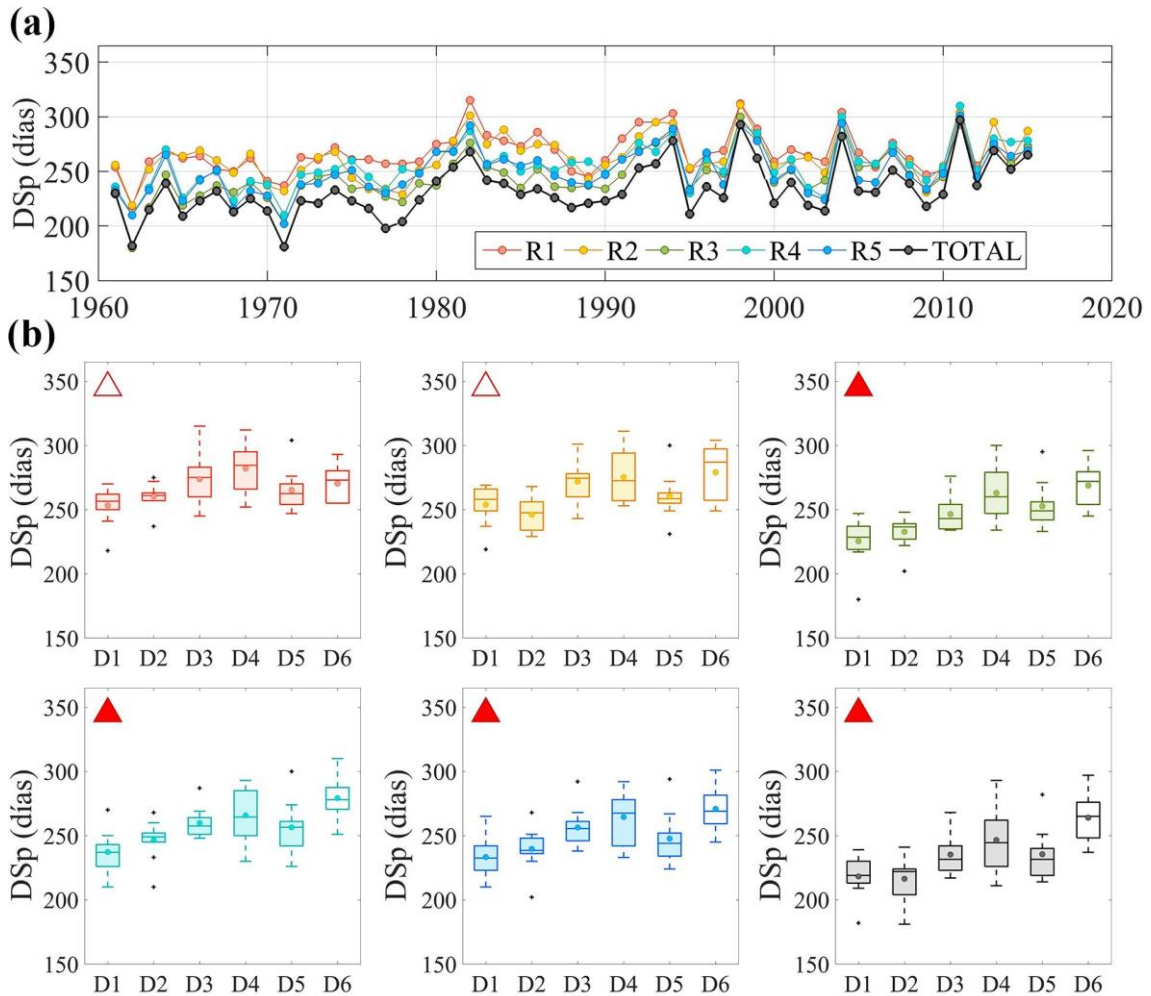


Figura 2.2 Evolución DSp: a) evolución anual; b) Evolución anual por décadas: R1, rojo; R2, naranja; R3, verde; R4, turquesa; R5, azul; Total, negro. Tendencia encontrada en cada una de las estaciones a escala anual: Triángulo vértice hacia arriba (rojo): tendencia creciente; Triángulo vértice hacia abajo (azul): tendencia decreciente. En ambos casos, la intensidad del color refleja las estaciones con tendencia estadísticamente significativa superior al 90% de confianza.

Tabla 2.3 Tabla resumen de los valores medios del índice Dsp durante el periodo 1961-2015 en las regiones en las que se divide la zona de estudio (R1-R5) y todo el área analizada (Total) junto con las tendencias anuales asociadas. Los resultados del análisis de tendencias se definen según el test de Mann-Kendall como (1) significancia del $\alpha=0,01$ (**); (2) significancia del $\alpha=0,05$ (*); (3) significancia del $\alpha=0,1$ (+); o (4) sin significancia, $\alpha>0,1$ (+).

	Dsp (días)				
	Máxima	Media	Mínima	Desviación	Tendencia
ADRA (R1)	315	267,2	218	18,5	0,32 (+)
ANDARAX (R2)	311	263,1	219	20,3	0,42 (+)
FARDES (R3)	300	246,3	180	22,4	0,83 (***)
GENIL (R4)	310	255,5	210	20,6	0,65(***)
GUADALFEO (R5)	301	250,3	202	21,5	0,58(***)
TOTAL	297	233,4	181	23,9	0,75(***)

Índice de aridez (IAp)

Escala Distribuida

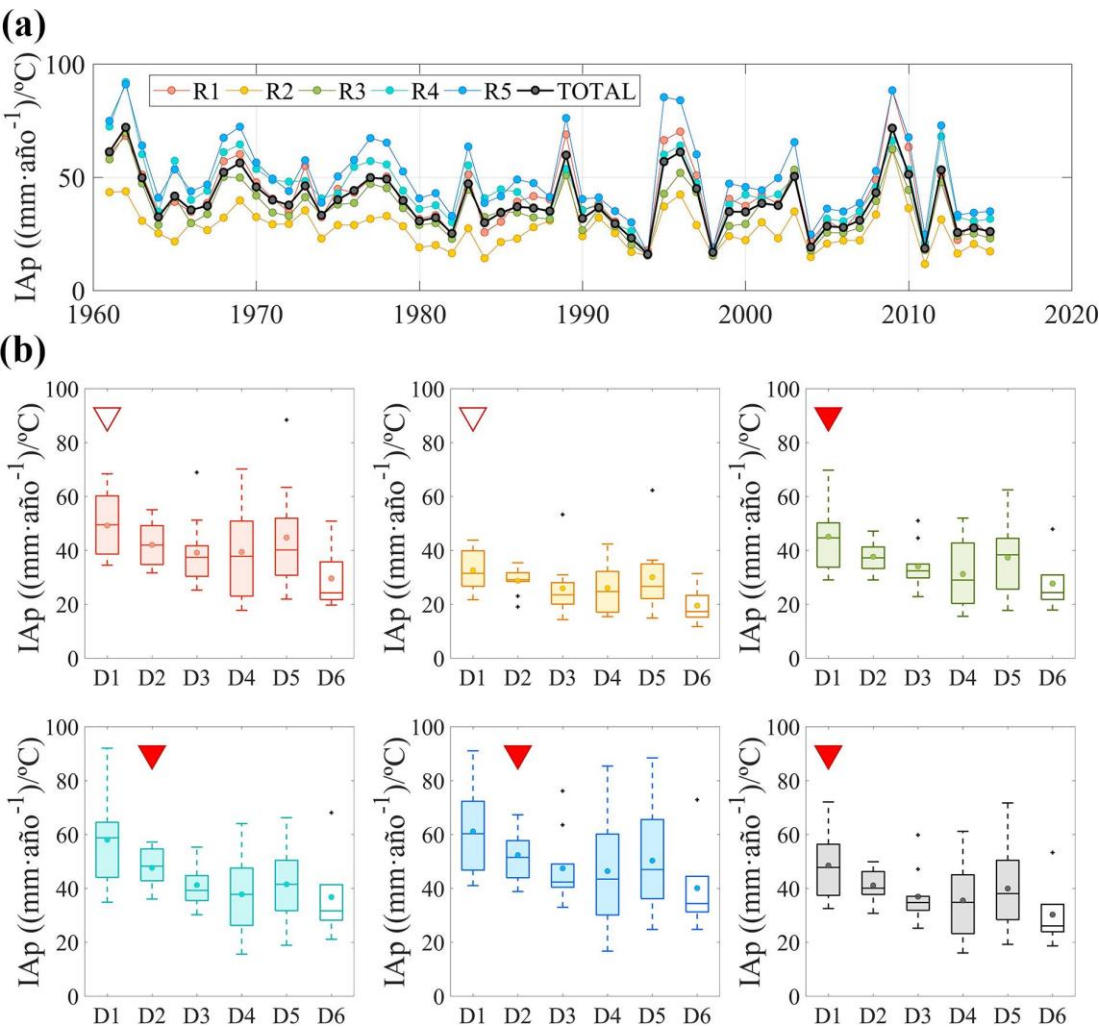


Figura 2.3 Evolución IAp: a) evolución anual; b) Evolución anual por décadas: R1, rojo; R2, naranja; R3, verde; R4, turquesa; R5, azul; Total, negro. Tendencia encontrada en cada una de las estaciones a escala anual: Triángulo vértice hacia abajo (rojo): tendencia decreciente; Triángulo vértice arriba (azul): tendencia creciente. En ambos casos, la intensidad del color refleja las estaciones con tendencia estadísticamente significativa superior al 90%.

La evolución del valor de IAp promedio para toda la zona de estudio y para cada una de las regiones definidas en este trabajo (Figura ii) se muestra en la Figura 2.3. El análisis anual cuantifica el conocido gradiente este-oeste para las condiciones de aridez en la zona de estudio, con la región R2 (Andarax) como la más representativa del carácter árido, con valores inferiores

a las restantes para todo el periodo, siendo por el contrario la región R5 (Guadalfeo) la más húmeda seguida de la R4 (Genil). No obstante, en el análisis por décadas incluido en la figura y a escala global del periodo de estudio (Tabla 2.4) pone de manifiesto que estas regiones más húmedas son las que mayor tendencia decreciente muestran para el índice de aridez a ambas escalas. Cabe destacar que el índice muestra una tendencia decreciente significativa en todas las regiones al menos a un nivel de confianza del 95%, con intensificación de la aridez entre 0.1 y 0.4 mm/°C a lo largo del eje este-oeste en la zona (Tabla 2.4). Las regiones norte, en particular, Genil (R4) muestran las tendencias de aridificación más significativas en la zona de estudio, aunque sus valores absolutos medios no sean los menores a escala de regiones.

Tabla 2.4 Tabla resumen de los valores medios del índice IAp durante el periodo 1961-2015 en las regiones en las que se divide la zona de estudio (R1-R5) y toda el área analizada (Total) junto con las tendencias anuales asociadas. Los resultados del análisis de tendencias se definen según el test de Mann-Kendall como (1) significancia del $\alpha=0,01$ (**); (2) significancia del $\alpha=0,05$ (*); (3) significancia del $\alpha=0,1$ (*); o (4) sin significancia, $\alpha>0,1$ (+).

	IAp (mm/°C)				
	Máxima	Media	Mínima	Desviación	Tendencia
ADRA (R1)	88,4	41,7	17,7	14,9	-0,17 (**)
ANDARAX (R2)	62,2	27,8	11,7	9,7	-0,12 (**)
FARDES (R3)	69,7	36,2	15,5	11,7	-0,24 (***)
GENIL (R4)	92,0	44,5	15,6	14,7	-0,38 (***)
GUADALFEO (R5)	91,0	50,5	16,7	17,4	-0,28 (**)
TOTAL	72,1	39,5	16,0	12,9	-0,24 (***)

La distribución espacial del índice de aridez medio en las cinco décadas completas del periodo estudiado y los seis años que forman la última década aún incompleta entre el año hidrológico 2010-2015 se muestra en la Figura 2.4. El índice IA_a se ha obtenido en a partir de los valores de la precipitación anual y la temperatura media en cada celda. Los mapas muestran no sólo la heterogeneidad espacial en las condiciones de aridez generada por los marcados gradientes topográficos en la zona, sino también la variabilidad temporal a escala decenal. Los resultados muestran a esta escala decenal un aumento de la aridez a lo largo del periodo de estudio que va afectando a las cotas más altas, replegándose hacia las cumbres el dominio típico húmedo (IAp>160 mm/°C) y templado húmedo (100<IAp<160 mm/°C) a medida que se aproxima el final del periodo de estudio, con cierta leve recuperación a partir de 2000. Esto implica que las cumbres resultan las zonas que más ganancia de aridez están experimentando a lo largo de las décadas desde 1961. Por otro lado, se observa cierta evolución hacia una homogeneización del nivel de aridez en la zona este y norte de Sierra Nevada, incluso en sus cotas más altas que pueden llegar a perder en alguna década su carácter templado o húmedo; la región de Andarax (R2) es la que sufre mayor impacto de este proceso.

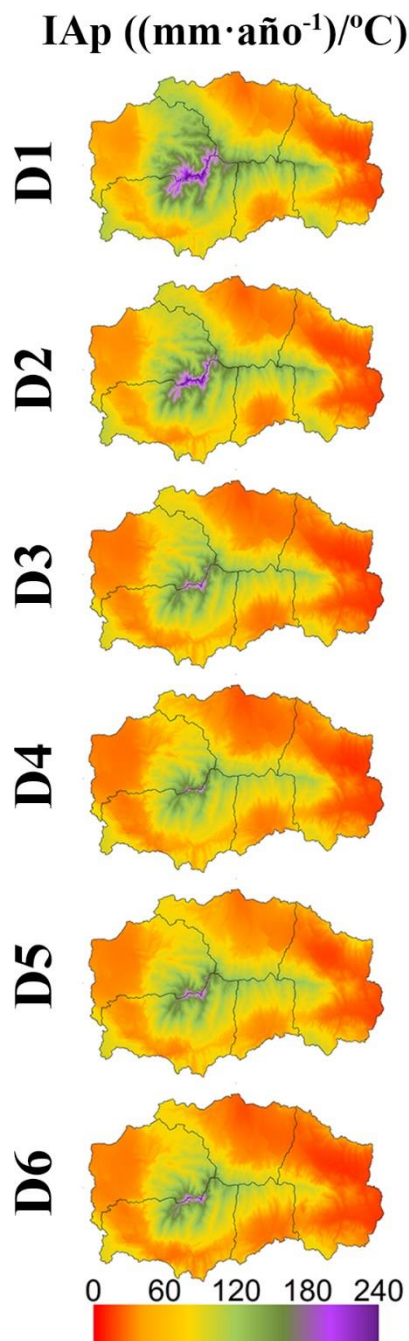


Figura 2.4 Distribución espacial del valor medio del índice de aridez, IAP, a escala de década (D1, 1961-1970; D2, 1971-1980; D3, 1981-1990; D4, 1991-2000; D5, 2001-2010; D6 incompleta, 2011-2015; años hidrológicos) para el periodo 1961-2015 (0-40, estepario; 40-60, semiárido; 60-100, templado cálido; 100-160, templado húmedo; >160, húmedo).

Índice de torrencialidad de la precipitación (ITp)

Escola Distribuida

La Figura 2.5 muestra la evolución anual del ITp. Este índice muestra en qué día del año (considerándose el año hidrológico con inicio a 1 de septiembre) se alcanzan un porcentaje dado de la precipitación anual. Los índices que se muestran en este caso son el 10, 50, 75, 90, 95 y 99 % de la precipitación anual. La Tabla 2.5 muestra los valores estadísticos por regiones analizadas. Este índice aporta información sobre la posible concentración de la precipitación en un menor periodo de tiempo y por tanto es un estimador de la torrencialidad media del año.

Los resultados muestran cómo para la mayoría de los umbrales analizados la acumulación de precipitación muestra un adelanto en el año hidrológico, no uniforme a lo largo del mismo. Las primeras precipitaciones y hasta alcanzar el 50% del volumen anual tienden a adelantarse en el año un promedio de 13 días para el periodo completo de estudio; el percentil 75 se alcanza sin embargo con cierto retraso acumulado al final del periodo. Por último, el percentil 95 se va adelantando a lo largo del año hidrológico e indica una disminución de precipitación al final de la primavera e inicio del verano, quedando el percentil 99 retrasado al final de este en las regiones este (R2) y norte (R3), con más eventos tormentosos. R2 es la única región en la que se adelantan todos los percentiles estudiados, a excepción del 99, con una pérdida generalizada de precipitación a final de primavera y durante gran parte del verano. No obstante, ninguna de las tendencias anteriores es significativa con un nivel de confianza mínimo del 90%, dada la gran variabilidad del patrón intraanual de la precipitación, como muestra la Figura 1.19.

Tabla 2.5 Tabla resumen de los valores medios del índice ITp durante el periodo 1961-2015 en las regiones en las que se divide la zona de estudio (R1-R5) y todo el área analizada (Total) junto con las tendencias anuales asociadas. Los resultados del análisis de tendencias se definen según el test de Mann-Kendall como (1) significancia del $\alpha=0,01$ (**); (2) significancia del $\alpha=0,05$ (*); (3) significancia del $\alpha=0,1$ (*); o (4) sin significancia, $\alpha>0,1$ (+).

		ITp					
		P10	P50	P75	P90	P95	P99
ADRA (R1)	Máxima	117	215	277	299	357	365
	Media	53,8	136,0	192,1	240,3	260,4	304,4
	Mínima	19	65	87	168	186	241
	Desviación	25,6	34,6	32,3	30,2	29,9	35,9
	Tendencia	-0,29 (+)	-0,33(+)	0,06 (+)	-0,14 (+)	-0,25 (+)	-0,19 (+)
ANDARAX (R2)	Máxima	118	227	296	302	357	366
	Media	53,9	137,5	200,4	246,3	269,3	317,2
	Mínima	6	62	136	185	186	244
	Desviación	26,3	38,3	32,0	24,6	31,4	35,7
	Tendencia	-0,30 (+)	-0,59 (+)	-0,13 (+)	-0,33 (+)	-0,57 (+)	0,11 (+)
FARDES (R3)	Máxima	117	227	280	303	362	365
	Media	54,2	114,9	203,5	248,5	270,9	316,9
	Mínima	13	69	135	189	216	260
	Desviación	24,5	31,9	31,2	26,9	22,4	33,8
	Tendencia	-0,27 (+)	-0,17 (+)	0,15 (+)	0,06 (+)	-0,19 (+)	0,06 (+)
GENIL (R4)	Máxima	117	214	246	298	317	365
	Media	52,6	140,8	197,4	241,6	265,8	300,4
	Mínima	13	70	137	192	218	250
	Desviación	23,6	28,3	27,1	22,9	20,2	30,3
	Tendencia	-0,36 (+)	-0,22 (+)	0,05 (+)	-0,08 (+)	-0,20 (+)	-0,02 (+)
GUADALFEO (R5)	Máxima	117	227	242	299	357	365
	Media	54,1	136,8	189,1	236,9	261,9	261,8
	Mínima	14	64	89	177	207	250
	Desviación	25,2	33,1	30,2	27,5	25,8	30,5
	Tendencia	-0,36 (+)	-0,22 (+)	0,07 (+)	-0,17 (+)	-0,28 (+)	-0,29 (+)
TOTAL	Máxima	117	227	262	299	325	365
	Media	53,5	138,8	195,8	241,5	266,6	308,7
	Mínima	8	65	112	186	208	259
	Desviación	24,9	33,4	30,6	24,7	22,8	31,3
	Tendencia	-0,37 (+)	-0,25 (+)	0,08 (+)	-0,11 (+)	-0,32 (+)	0,02 (+)

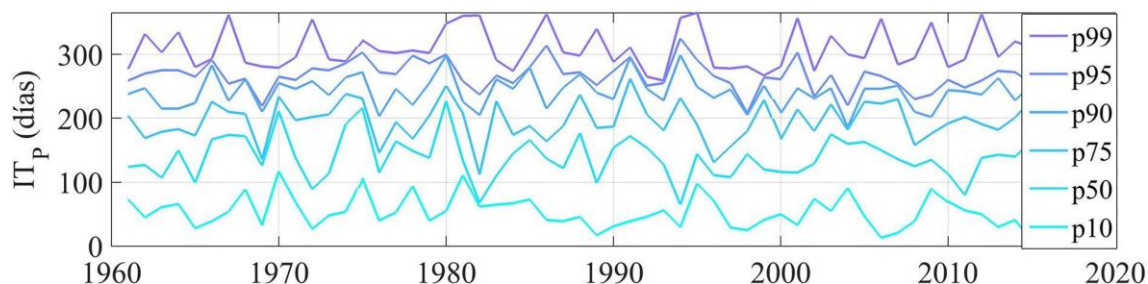


Figura 2.5 Evolución anual del ITp en Sierra Nevada en los umbrales: 10,50,75,90,95 y 99, durante el periodo 1961-2015 toda el área analizada.

Índice de intensidad de precipitación (Ip)

Escala Puntual

La Figura 2.6 muestra el índice de intensidad de la precipitación obtenida como la relación entre la precipitación anual y el número de días con precipitación al año en las cuencas analizadas en este apartado (R2 y R5). El análisis regional muestra cómo la evolución de la R5 es no solo superior en magnitud, sino también más variable que la R2, que presenta un carácter más monótono entre estaciones. El análisis en los puntos de control muestra cómo ambas regiones tienen régimen variable extremo en ciertas estaciones, que podrían ser propios de una zona con intensidades de precipitación muy variables. La evolución creciente de esta intensidad a lo largo de los años analizados para todas las estaciones disponibles en este estudio confiere al área un carácter torrencial para las dos regiones características del clima alpino (en las zonas de mayor cota) y árido, R5 y R2, respectivamente, con índices de aridez muy diferentes entre sí, 50.5 y 27.8 (Tabla 2.4).

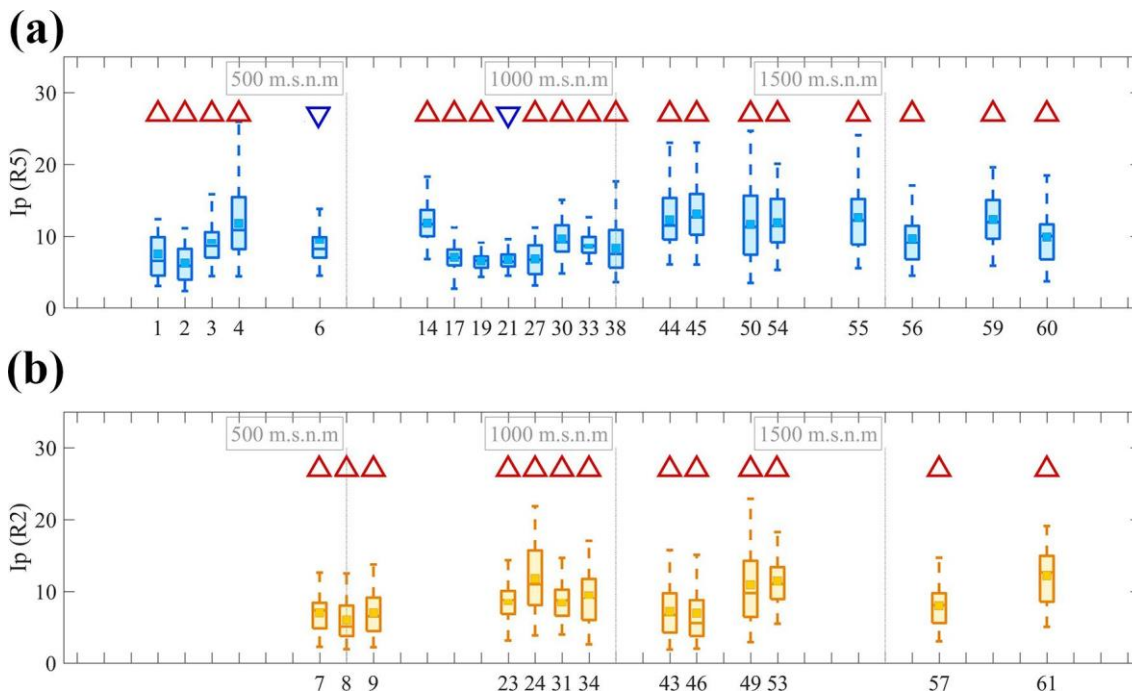


Figura 2.6 Distribución de los valores anuales del índice Ip para el periodo 1961-2015 en las regiones R2 y R5. a) Diagrama de cajas de las estaciones de la R2 b) Diagrama de cajas de las estaciones de la R5 (representadas en orden creciente de cota). Tendencia encontrada en cada uno de las estaciones a escala anual: Triángulo vértice hacia arriba (rojo): tendencia creciente; Triángulo vértice hacia abajo (azul): tendencia decreciente. En ambos casos, la intensidad del color refleja las estaciones con tendencia estadísticamente significativa con nivel de confianza superior al 90%.

Escala Distribuida

La evolución anual y decenal de los valores de I_p durante el periodo de estudio (1961-2015) se muestran en la figura 2.7 tanto agregado para toda la zona de estudio como distribuido por regiones. El valor medio para la zona de estudio arroja una intensidad media de precipitación de 3.9 mm/día. A lo largo de todo el periodo analizado, las regiones R2 y R3 muestran patrones muy similares al patrón promedio para toda la zona de estudio, y las regiones con mayor representación de clima de alta montaña (R1, R4 y R5) se agrupan con un mayor orden de magnitud en el valor de este índice estando R4 y R5 muy próximas, con evolución similar al conjunto. La región norte, R1, y la región suroeste, R5, son las que presentan mayores valores de este índice; cabe recordar que estas tres regiones son las que mostraron las tendencias más marcadas de aridificación en la zona de estudio.

No se ha encontrado significancia con nivel de confianza mínimo del 90% para las tendencias anuales ni decenales (Fig. 2.8b y Tabla 2.6); de hecho, se puede observar una evolución media decreciente de este índice a escala global hasta el año 1994/95, que cambia de sentido durante el periodo restante. La cuarta década incluye los valores mínimo y máximo absoluto de todo el periodo en todas las regiones y a escala global.

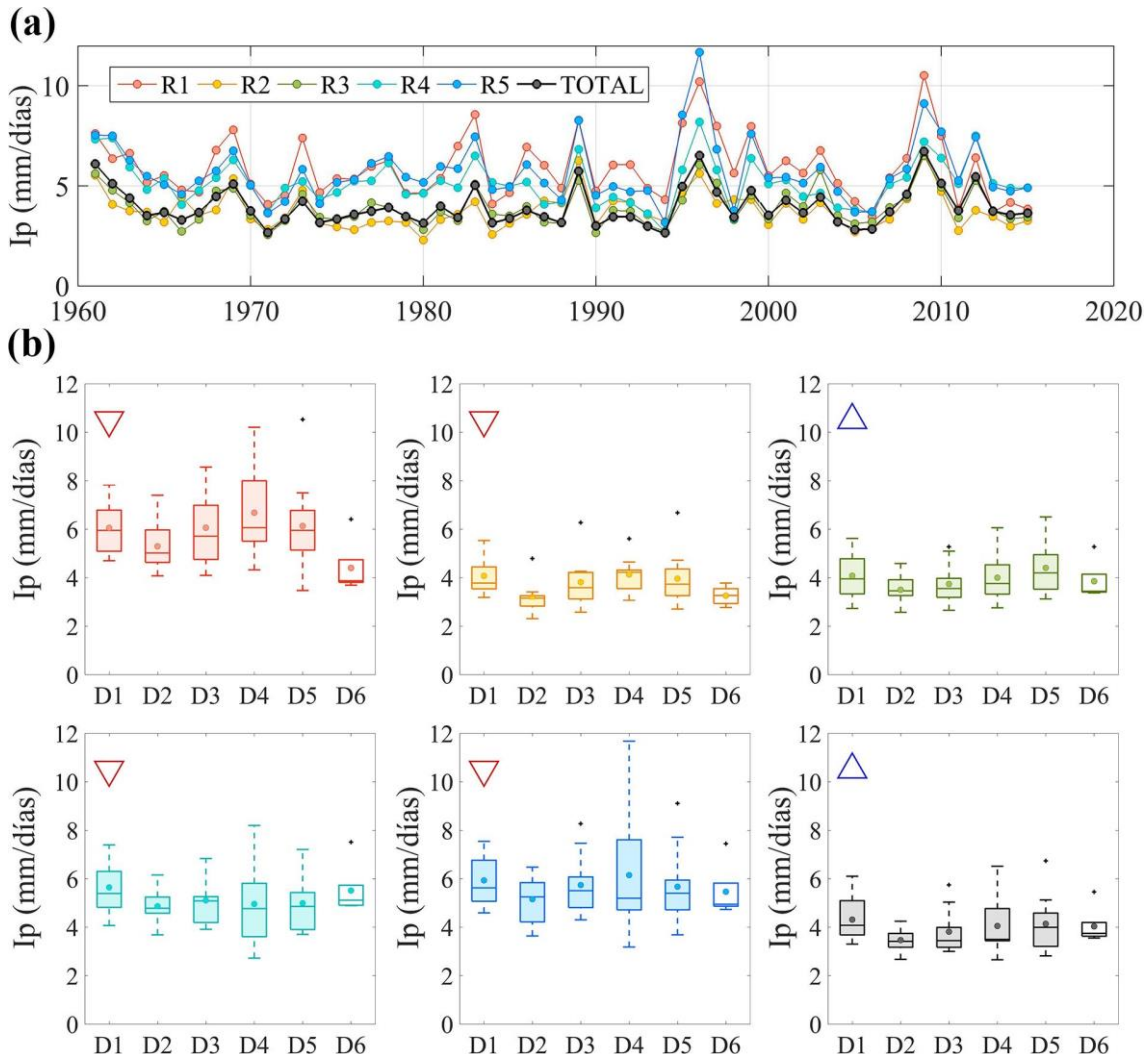


Figura 2.7 Evolución I_p : a) evolución anual; b) Evolución anual por décadas: R1, rojo; R2, naranja; R3, verde; R4, turquesa; R5, azul; Total, negro. Tendencia encontrada en cada uno de las estaciones a escala anual: Triángulo vértice hacia abajo (rojo): tendencia decreciente; Triángulo vértice arriba (azul): tendencia creciente. En ambos casos, la intensidad del color refleja las estaciones con tendencia estadísticamente significativa superior al 90%.

Tabla 2.6 Tabla resumen de los valores medios del índice Ip durante el periodo 1961-2015 en las regiones en las que se divide la zona de estudio (R1-R5) y toda el área analizada (Total) junto con las tendencias anuales asociadas. Los resultados del análisis de tendencias se definen según el test de Mann-Kendall como (1) significancia del $\alpha=0,01$ (**); (2) significancia del $\alpha=0,05$ (**); (3) significancia del $\alpha=0,1$ (*); o (4) sin significancia, $\alpha>0,1$ (+).

	Ip (mm/días)				
	Máxima	Media	Mínima	Desviación	Tendencia
ADRA (R1)	10,5	5,9	3,5	1,6	-0,0019 (+)
ANDARAX (R2)	6,7	3,8	2,3	0,9	0,0009 (+)
FARDES (R3)	6,5	3,9	2,6	0,9	0,0076 (+)
GENIL (R4)	8,2	5,1	2,7	1,1	-0,0040 (+)
GUADALFEO (R5)	11,7	5,7	3,2	1,5	0,0034 (+)
TOTAL	6,7	3,9	2,6	0,9	0,0035 (+)

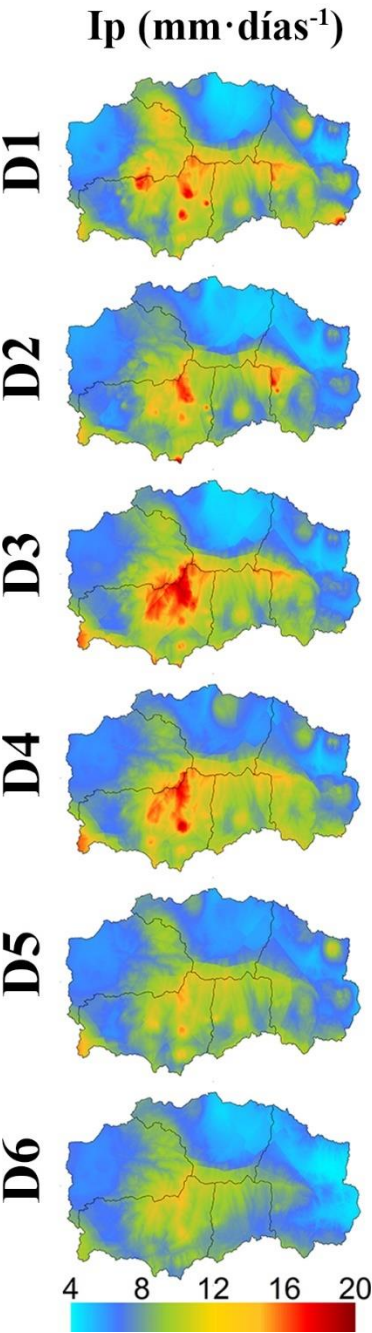


Figura 2.8 Distribución espacial del valor medio del índice de aridez, IAp, a escala de década (D1, 1961-1970; D2, 1971-1980; D3, 1981-1990; D4, 1991-2000; D5, 2001-2010; D6 incompleta, 2011-2015; años hidrológicos) para el periodo 1961-2015.

Al igual que el índice IAp, este índice ha sido analizado a escala distribuida en la zona de estudio. La Figura 2.8 muestra su evolución para cada una de las décadas analizadas en este estudio. Al igual que para la escala promedio, intensidades medias superiores fueron encontradas para las regiones con presencia de nieve (R1, R4 y R5). El caso de R3, aun teniendo un régimen alto de precipitaciones no mostró gran intensidad en los eventos, lo que supondría que la precipitación está más distribuida a lo largo del año hidrológico. Las regiones sur, Guadalfeo (R5) y Adra (R1), son las que presentan mayores valores de intensidad media. En relación a su evolución, destaca cómo existe un crecimiento de dicha intensidad en las cumbres en las primeras tres décadas que resulta decreciente en las siguientes últimas décadas. Hay que señalar que este índice no aporta información sobre eventos torrenciales sino sobre una intensidad media anual que puede asociarse con un carácter más o menos torrencial, pero que también responde a años especialmente húmedos.

2.3.1.2 Escala de evento

Puntual

Las figuras 2.10 y 2.11 muestran el índice de sequía y el índice de humedad en las estaciones pertenecientes a las regiones R5 y R2.

Índice de sequía (ISp)

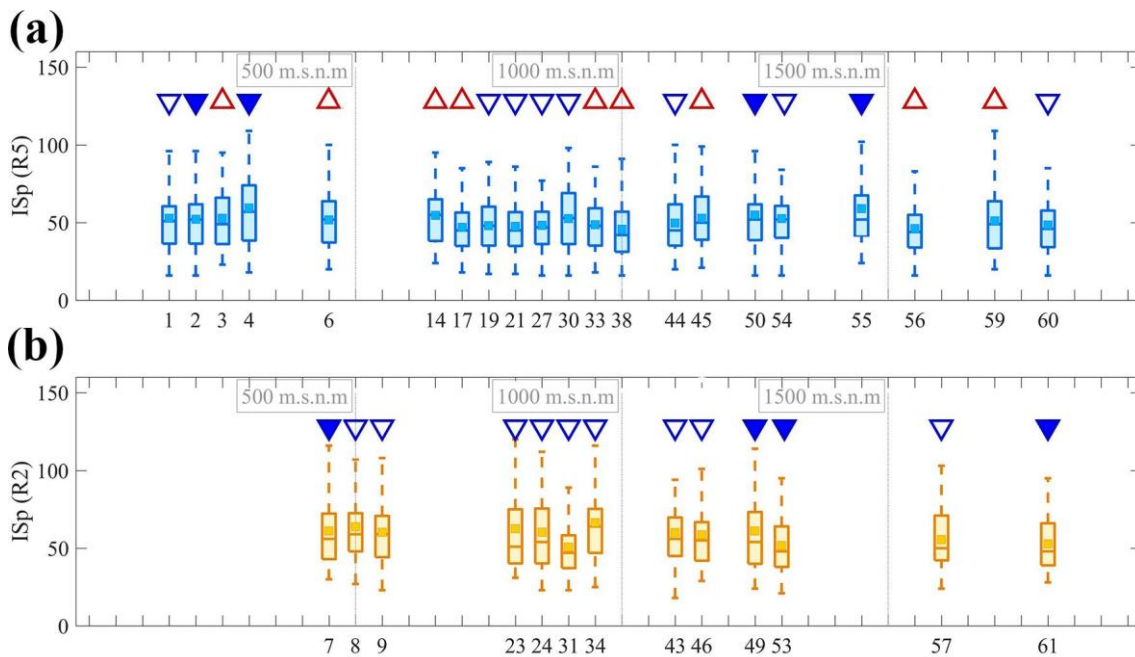


Figura 2.9 Evolución del índice ISp para el periodo 1961-2015 en las regiones R2 y R5. a) Diagrama de cajas de las estaciones de la R2 b) Diagrama de cajas de las estaciones de la R5 (representadas en orden creciente).Tendencia encontrada en cada uno de las estaciones a escala anual: Triángulo vértice hacia arriba (rojo): tendencia creciente; Triángulo vértice hacia abajo (azul): tendencia decreciente. En ambos casos, la intensidad del color refleja las estaciones con tendencia estadísticamente significativa superior al 90%.

Este índice aporta información sobre el régimen de precipitación del periodo estival, dada la ausencia de precipitación durante este periodo típica del área mediterránea. Por su carácter árido, el ISp muestra valores más altos para la R2. El análisis de este índice por estaciones en esta región (Figura 2.9b) muestra una pequeña disminución en el índice ISp a medida que aumenta la cota de la estación, lo cual señala la mayor pluviosidad en dichas bandas de cota; asimismo, las tendencias resultantes para todo el periodo de estudio, si bien solo significativas

en algunas estaciones, son decrecientes en todos los casos, recogiendo el aumento de episodios de precipitación de final de agosto señalado en el Capítulo 1.

Sin embargo, el análisis realizado para las estaciones de la R5 (Figura 2.9a) representa un carácter más variable, con tendencias creciente y decreciente según las estaciones en todas las bandas de cota, que solo alcanzan significancia con un nivel de confianza del 90% en algunos casos siempre de tendencia negativa.

Índice de humedad (IH_p)

El análisis del máximo de días consecutivos con precipitación al año (índice IH_p) para las dos regiones estudiadas se muestra en la Figura 2.10. Como era de esperar, debido a su carácter más propio de un clima de alta montaña, existen más días consecutivos de precipitación para la R5 que para la R2. No obstante, para ambas regiones se observa tendencia decreciente (en general no significativa) en algunas estaciones. Este decrecimiento relacionando con el visible aumento de la intensidad de precipitación (Ip) (Figura 2.7), señalan un aumento de la torrencialidad en los eventos. La R5, confirmando su carácter húmedo con respecto a la R2 en las estaciones además de arrojar un pequeño aumento del número de días máximos con precipitación al año en las estaciones con cotas más altas. Además, cabe destacar en esta región la presencia de valores extremos, que confieren a la región de un carácter variable en cuanto al número de días consecutivos de precipitación.

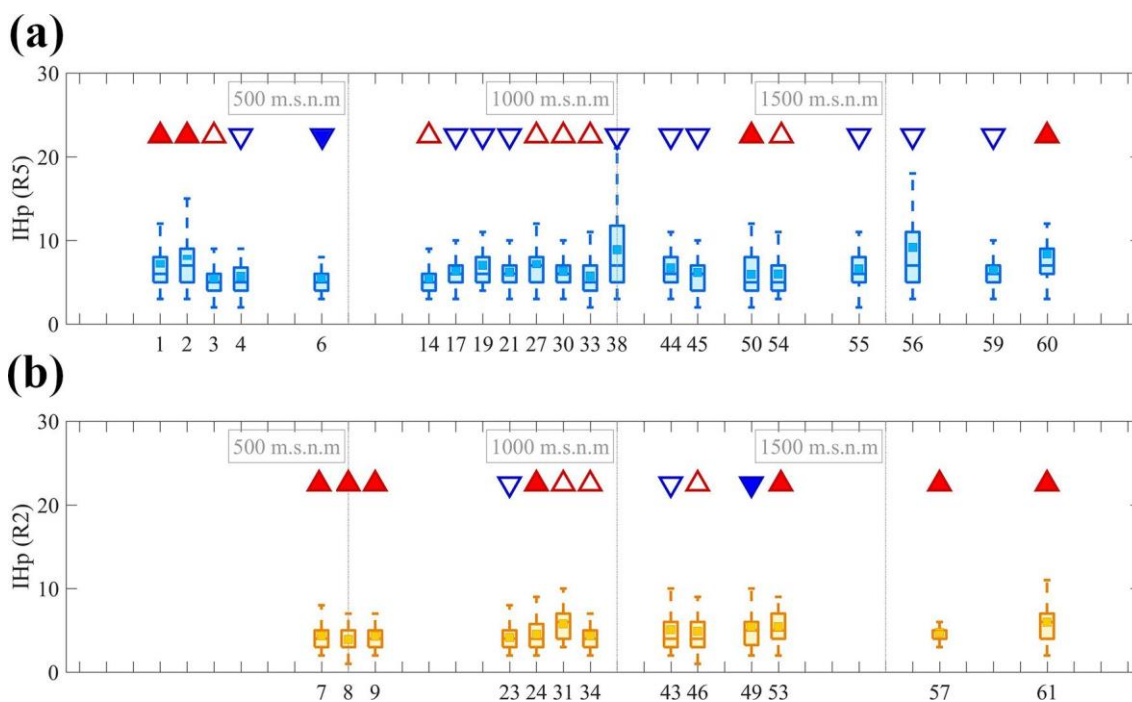


Figura 2.10 Evolución del índice I_{Sp} para el periodo 1961-2015 en las regiones R2 y R5. a) Diagrama de cajas de las estaciones de la R2 b) Diagrama de cajas de las estaciones de la R5 (representadas en orden creciente). Tendencia encontrada en cada uno de las estaciones a escala anual: Triángulo vértice hacia arriba (rojo): tendencia creciente; Triángulo vértice hacia abajo (azul): tendencia decreciente. En ambos casos, la intensidad del color refleja las estaciones con tendencia estadísticamente significativa con nivel de confianza superior al 90%.

Distribuido

Índice de sequía de nieve (ISn), Temperatura (ITs), Humedad de nieve (IHn), e Intensidad asociada a IHn (IHP)

Los eventos extremos anuales áridos y torrenciales se muestran en la Figura 2.11 para todo el área de estudio en el periodo analizado. El número de días secos oscila entre los 81 y 20 días al año de media, siendo el valor bastante más inferior para el caso de los números de días con precipitación consecutiva (ISH), que no supera los 12 días al año de media. En los resultados, se observa una disminución del número de días húmedos IHP, lo cual es un síntoma del aumento de la aridez. No obstante, el número de días secos también está sufriendo una disminución, lo cual es favorable para todas las áreas de estudio. La intensidad de precipitación asociada a dichos eventos supera de media la intensidad encontrada para la media de los eventos anuales. La temperatura asociada a los eventos áridos muestra la no relación directa entre la ocurrencia de dichos eventos extremos y la época del año en la que se dan.

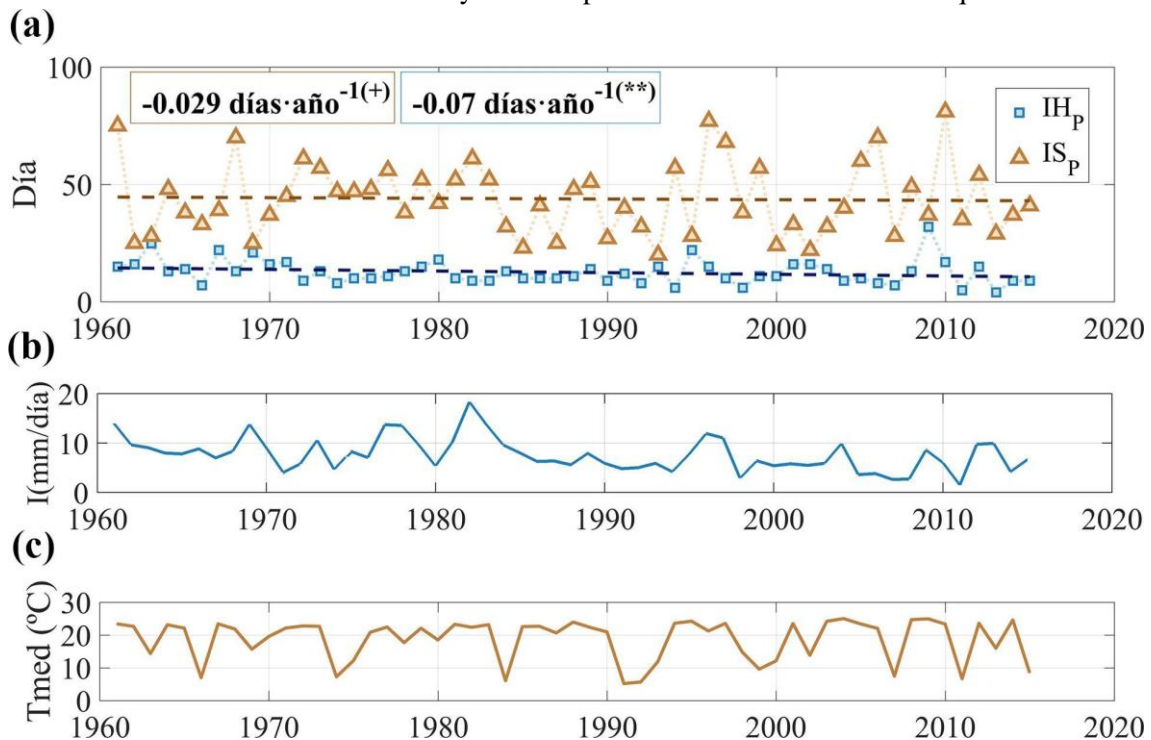


Figura 2.11 Evolución anual de los eventos extremos: a) índices ISp (marrón) y índice IHP (azul) b) la intensidad asociada al evento c) Tmedia asociada al evento durante el periodo 1961-2015 para todo el área de estudio.

2.3.2 Obtenidos con la precipitación en forma de nieve

2.3.2.1 Escala media

Índice días sin precipitación en forma de nieve (Dsn)

La evolución anual del número de días sin precipitación en forma de nieve se muestra en la Figura 2.12. En valor medio, con 309 días se definen las regiones R4 y R5 como las que poseen un menor número de sequía de la nieve. Los valores más favorables, también ocurren en dichas regiones. De nuevo se pone de manifiesto cómo la región de Andarax posee un mayor número de días sin precipitación en forma de nieve, oscilando sus valores extremos entre 360 y 312 días al año. La evolución anual para el DP, muestra para todas las regiones, una tendencia positiva muy acentuada hasta el año 1994 en el que se produce el máximo en todo el periodo. Las

tendencias para todo el periodo son crecientes significativas para todas las regiones. Aun poseyendo un mayor número de días sin precipitación en forma de nieve, las tendencias en las regiones áridas son inferiores que para las regiones con influencia alpina. Lo cual, supone una pérdida de días aún más acentuada en las regiones afectadas por la nieve.

Este índice está relacionado de manera inversa con la intensidad media de cada uno de los eventos en estos días (In), índice que se muestra en la figura D. Por ello, el aumento del In y por otro lado del IDsn, concluyen un aumento de la torrencialidad en todas las cuencas de estudio.

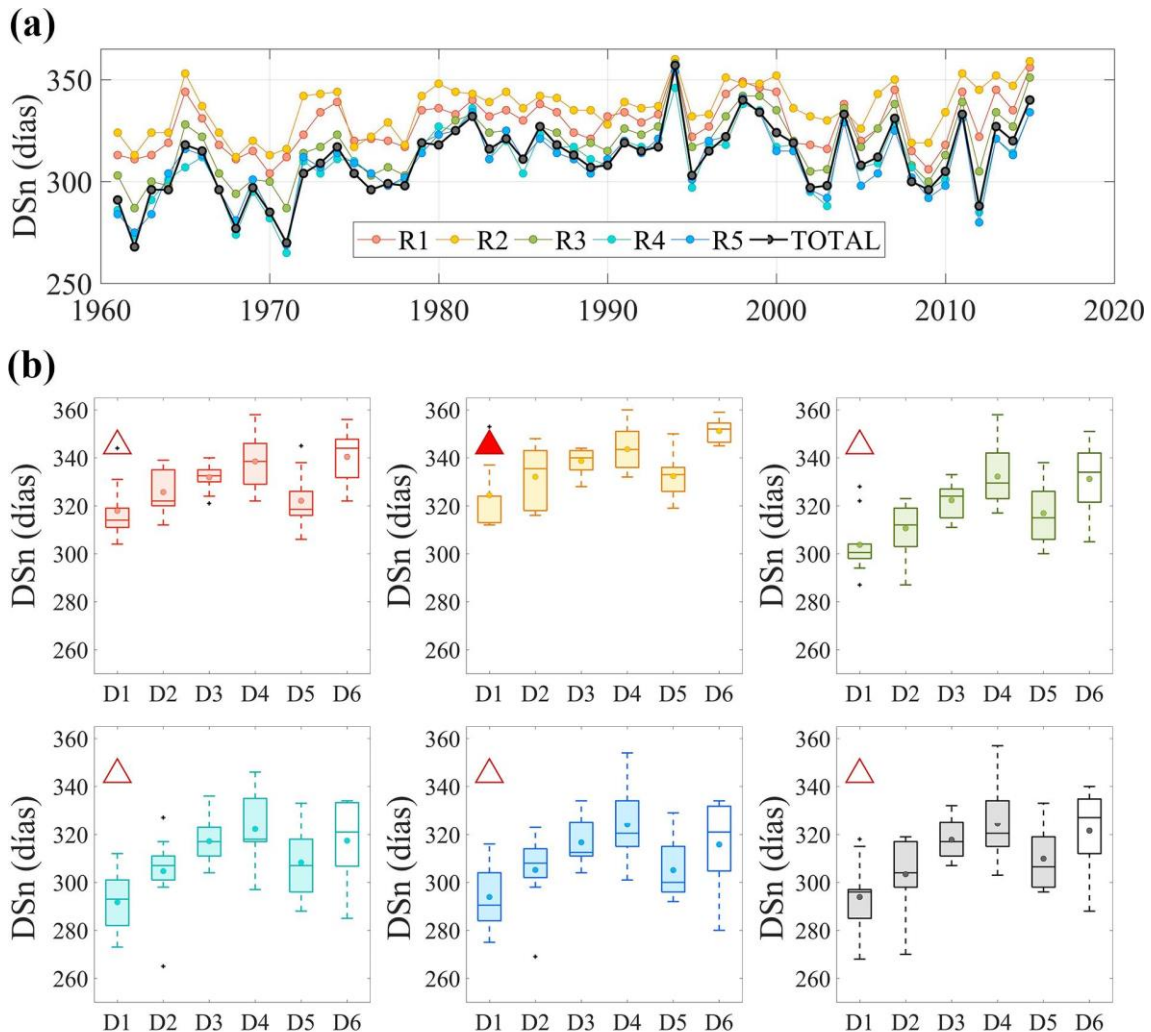


Figura 2.12 Evolución DSsn: a) evolución anual; b) Evolución anual por décadas: R1, rojo; R2, naranja; R3, verde; R4, turquesa; R5, azul; Total, negro. Tendencia encontrada en cada uno de las estaciones a escala anual: Triángulo vértice hacia arriba (rojo): tendencia creciente; Triángulo vértice hacia abajo (azul): tendencia decreciente. En ambos casos, la intensidad del color refleja las estaciones con tendencia estadísticamente significativa superior al 90%.

Tabla 2.7 Tabla resumen de los valores medios del índice Dsn durante el periodo 1961-2015 en las regiones en las que se divide la zona de estudio (R1-R5) y toda el área analizada (Total) junto con las tendencias anuales asociadas. Los resultados del análisis de tendencias se definen según el test de Mann-Kendall como (1) significancia del $\alpha=0,01$ (**); (2) significancia del $\alpha=0,05$ (**); (3) significancia del $\alpha=0,1$ (+); o (4) sin significancia, $\alpha>0,1$ (+).

	Dsn (días)				
	Máxima	Media	Mínima	Desviación	Tendencia
ADRA (R1)	358	328,4	304	12,7	0,27 (**)
ANDARAX (R2)	360	335,8	312	12,4	0,35 (***)
FARDES (R3)	358	318,4	287	15,3	0,48 (***)
GENIL (R4)	346	309,6	265	17,2	0,46 (***)
GUADALFEO (R5)	354	309,6	269	17,0	0,39 (**)
TOTAL	357	310,9	268	17,4	0,50 (***)

Índice de aridez de la nieve (IAN)

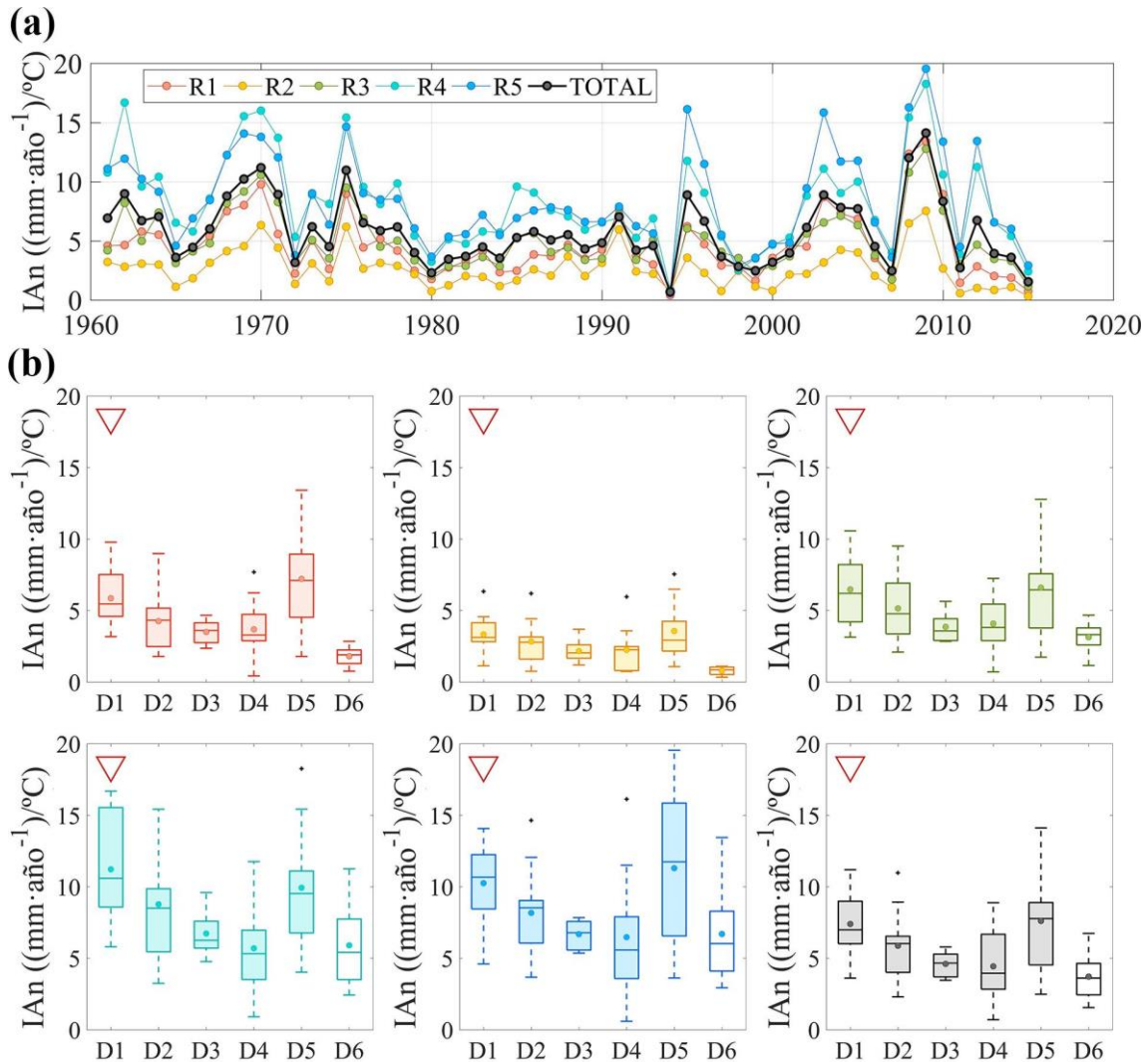


Figura 2.13 Evolución IAN a) evolución anual; b) Evolución anual por décadas: R1, rojo; R2, naranja; R3, verde; R4, turquesa; R5, azul; Total, negro. Tendencia encontrada en cada uno de las estaciones a escala anual: Triángulo vértice hacia abajo (rojo): tendencia decreciente; Triángulo vértice arriba (azul): tendencia creciente. En ambos casos, la intensidad del color refleja las estaciones con tendencia estadísticamente significativa superior al 90%.

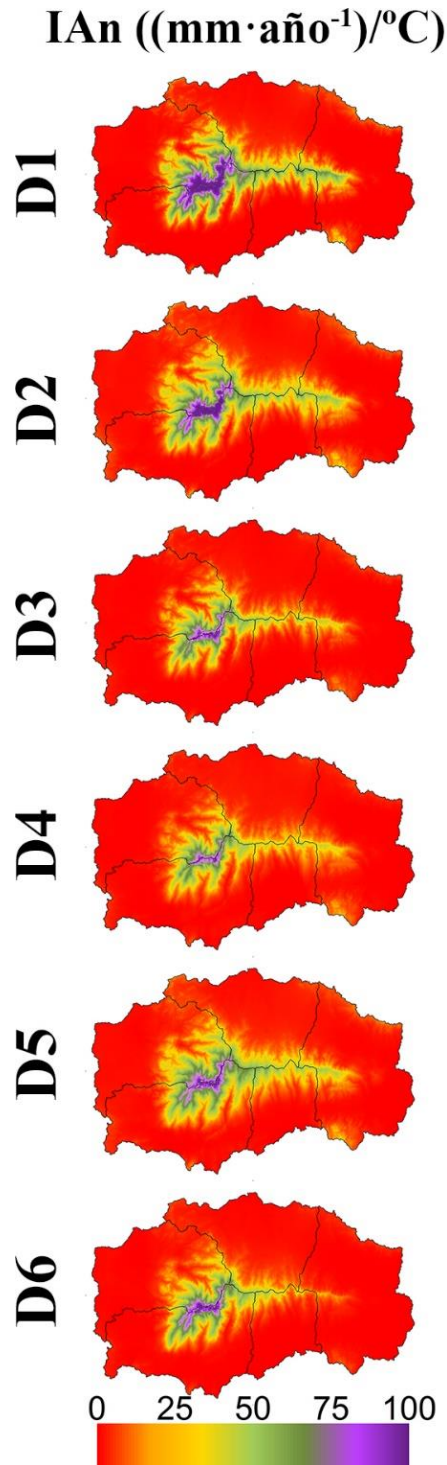


Figura 2.14 Distribución espacial del valor medio del índice de aridez, IAn, a escala de década (D1, 1961-1970; D2, 1971-1980; D3, 1981-1990; D4, 1991-2000; D5, 2001-2010; D6 incompleta, 2011-2015; años hidrológicos) para el periodo 1961-2015.

La evolución anual del Índice de aridez nival (IAN) se muestra en la Figura 2.13 para todas las regiones de estudio. Valores superiores confieren a la zona de estudio áreas más húmedas y más representativas de la presencia de nieve. Los valores generales, muestran un índice mayor para el caso de la R5, solo superado por R4 en la primera década analizada. Del mismo modo, estos valores superiores para R5 son observados en el análisis por décadas y en los valores estadísticos (Tabla 2.8), lo cual confirma su carácter alpino. A escala de década, destaca la variabilidad entre regiones y décadas analizadas y cómo de nuevo en esta variable destaca la D5 por su alta variabilidad, más acentuada para R5. En esta década se invierte la evolución

observada en las décadas previas, con una gran recuperación en el caso de R5 y R1, las regiones sur, que es más amortiguada para las regiones norte, R3 y R4. En el estudio de tendencias medias anuales para todo el periodo, se observa cómo son negativas para todas las regiones, siendo estadísticamente significativas para R2 y R4, lo cual significaría que dichas regiones están aumentando su grado de aridez de la nieve.

A escala global, la zona de estudio está aumentando su aridez referida a la precipitación en forma de nieve, en el periodo de estudio, con tendencia significativa a un nivel de confianza del 90%.

El índice de aridez de nieve se muestra a escala espacial distribuida en la Figura 2.14. En cotas en las que no hay presencia de nieve este índice es, evidentemente, nulo. En estas zonas, el cambio es inapreciable debido a que ya en los primeros años de estudios sus valores son muy bajos. En cotas superiores a 2000 m s.n.m. este valor empieza a mostrar zonas húmedas en cuanto a nieve. A nivel general, se observa una disminución en las cumbres de las zonas con valores extremos, que indica un aumento de la aridez debida a la pérdida de precipitación en forma de nieve y un aumento de las temperaturas medias. No obstante, esta disminución del índice es más severa entre la D1 y la D4, siendo la D5 década que abarca más superficie de carácter de la nieve que sus antecesoras (D4 y D3). La D6, aunque sin analizarla completa en este estudio, arroja un carácter más árido que el encontrado en D5 pero sin embargo superior al recogido en la D4. Por tanto, la aridez de la nieve va afectando de manera creciente a la zona de estudio, siendo más severa cuanto más elevada es la cota analizada.

Tabla 2.8 Tabla resumen de los valores medios del índice IAn durante el periodo 1961-2015 en las regiones en las que se divide la zona de estudio (R1-R5) y todo el área analizada (Total) junto con las tendencias anuales asociadas. Los resultados del análisis de tendencias se definen según el test de Mann-Kendall como (1) significancia del $\alpha=0,01$ (**); (2) significancia del $\alpha=0,05$ (*); (3) significancia del $\alpha=0,1$ (+); o (4) sin significancia, $\alpha>0,1$ (+).

	IAn (mm/°C)				
	Máxima	Media	Mínima	Desviación	Tendencia
ADRA (R1)	13,41	4,62	0,43	2,7	-0,008 (+)
ANDARAX (R2)	7,54	2,64	0,33	1,6	-0,012 (**)
FARDES (R3)	12,77	5,04	0,71	2,5	-0,022 (+)
GENIL (R4)	18,25	8,24	0,90	3,9	-0,062 (**)
GUADALFEO (R5)	19,54	8,40	0,59	4,0	-0,011 (+)
TOTAL	14,11	5,77	0,70	2,8	-0,025 (*)

Índice de torrencialidad de la nieve (ITn)

La evolución anual del índice de torrencialidad de la nieve (ITn) para el área de Sierra Nevada se muestra en la figura 2.15. Se han considerado, al igual que en el ITp, los percentiles p10, p50, p75, p90, p95 y p99. Los valores estadísticos obtenidos para las cinco regiones analizadas se exponen en la tabla H1. El 10% de la nieve se supera para SN con un valor medio en el día 93 del año hidrológico, que corresponde con finales de noviembre. Este umbral, presenta una tendencia positiva para todas las regiones de estudio, la cual indica que se está retrasando la ocurrencia de nieve. Aunque de manera global, el resto de regiones apoyan las tendencias positivas, el caso de la R5 en el p99 presenta una tendencia decreciente, que significaría que las últimas nevadas están adelantándose. Por otro lado, las diferencias entre la p10 y p50 para las regiones R4 y R5 son superiores que para el resto de regiones, pasando del día 80 al 150 (noviembre-febrero), meses en los que debieran de acumularse con más facilidad debido a que son los meses en los que las temperaturas son inferiores y son los meses de presencia de nieve. Además, la región R5 presenta las últimas nevadas (p99) más tardías con respecto al resto de

regiones. Se observa como para la R5 la distribución de los eventos de nieve es más repartida a lo largo del año hidrológico. Sin embargo, para el resto de las regiones las nevadas se concentran más en los meses de invierno, confirmando así un carácter más alpino durante todo el año para la región R5. De nuevo destaca, R4 y R5 que aunque de manera general las nevadas son más tardías, la ocurrencia entre p95 y p99 ocurre cada vez en un espacio de tiempo menor, de manera que en dichas nevadas aumenta la intensidad y la torrencialidad. Por último, destaca como la evolución de las precipitaciones tendían a adelantarse en el tiempo y por el contrario la ocurrencia de nieve, aunque no sea estadísticamente significativo, se está retrasando.

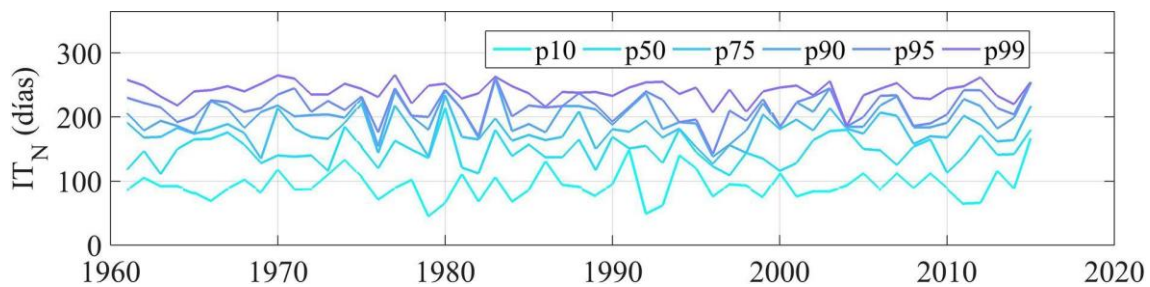


Figura 2.15 Evolución anual del ITn en el área de estudio para los umbrales: 10,50,75,90,95 y 99.

Tabla 2.9 Tabla resumen de los valores medios del índice ITn durante el periodo 1961-2015 en las regiones en las que se divide la zona de estudio (R1-R5) y todo el área analizada (Total) junto con las tendencias anuales asociadas. Los resultados del análisis de tendencias se definen según el test de Mann-Kendall como (1) significancia del $\alpha=0,01$ (**); (2) significancia del $\alpha=0,05$ (*); (3) significancia del $\alpha=0,1$ (*); o (4) sin significancia, $\alpha>0,1$ (+).

		ITn					
		P10	P50	P75	P90	P95	P99
ADRA (R1)	Máxima	167	234	235	245	261	270
	Media	96,2	150,1	175,6	198,6	209,8	230,2
	Mínima	45	111	125	129	129	145
	Desviación	26,6	24,2	24,2	23,6	25,2	22,5
	Tendencia	0,19(+)	-0,02(+)	-0,14(+)	0,03(+)	-0,15(+)	-0,18(+)
ANDARAX (R2)	Máxima	181	215	235	241	260	270
	Media	108,8	149,7	172,1	191,9	204,8	221,6
	Mínima	70	96	120	129	130	138
	Desviación	23,5	22,6	25,7	23,2	25,7	27,1
	Tendencia	0,47(+)	-0,01(+)	-0,33(+)	-0,29(+)	-0,37(+)	-0,56(+)
FARDES (R3)	Máxima	167	185	234	236	260	262
	Media	95,7	141,4	170,9	192,5	204,7	229,4
	Mínima	49	81	125	129	138	145
	Desviación	23,5	22,2	22,2	23,5	24,0	20,0
	Tendencia	0,09(+)	0,04(+)	-0,11(+)	-0,05(+)	-0,09(+)	0,03(+)
GENIL (R4)	Máxima	167	211	234	260	262	289
	Media	89,1	148,1	181,2	204,8	218,1	243,6
	Mínima	49	88	127	141	145	185
	Desviación	21,0	23,6	24,7	25,0	22,4	16,6
	Tendencia	0,26(+)	0,19(+)	0,15(+)	0,12(+)	0,12(+)	-0,16(+)
GUADALFEO (R5)	Máxima	167	214	234	260	262	288
	Media	89,3	149,2	181,6	205,7	218,5	243,3
	Mínima	43	89	125	141	144	188
	Desviación	23,4	25,2	26,4	26,0	22,4	17,1
	Tendencia	0,28(+)	0,14(+)	0,19(+)	0,08(+)	0,14(+)	-0,17(+)
TOTAL	Máxima	167	214	234	260	262	266
	Media	93,7	146,7	178,7	201,5	214,8	240,4
	Mínima	45	109	127	138	142	186
	Desviación	23,6	23,0	23,0	25,3	22,9	15,3
	Tendencia	0,15(+)	0,07(+)	0,06(+)	0,10(+)	-0,04(+)	-0,15(+)

Índice de intensidad de nieve (In)

La Figura 2.16 muestra la evolución anual durante el periodo 1961-2015 de la intensidad media de la precipitación en forma de nieve (In) en las regiones de estudio. Los valores obtenidos para la In oscilan entre los 3.0 y 4.4 mm/días para las regiones R2 y R5, respectivamente. Destaca, que aun siendo la comparativa entre las región más árida y alpina, respectivamente, la diferencia no resulta muy elevada, lo que supone que los eventos en la región árida son igualmente intensos. En todos los casos estudiados, las tendencias son crecientes, siendo los valores muy similares en todas las zonas, aunque partiendo de valores medios diferentes. Destaca la significancia que aportan dichas tendencias para las regiones de Fardes (R3) y Guadalfeo (R5) que se refleja en eventos con más intensidad de nieve y por tanto mayor torrencialidad en ellos. La escala de década muestra patrones diferentes en cuanto a las regiones se refieren. Por un lado, para las regiones situadas en la parte oeste (R1, R2 y R3) se observan comportamientos homogéneos entre D1 y la D3, seguido de un comportamiento creciente entre la D4 y la D5. Finalmente, la D6 parece seguir de nuevo el patrón encontrado entre D1 y D3. Por otro, las regiones más al este (R4 y R5) muestran una evolución similar entre las décadas D1 y D4, siendo la D5 la que rompe con dicha evolución, y pasando de nuevo la D6 al carácter similar observado en las décadas previas.

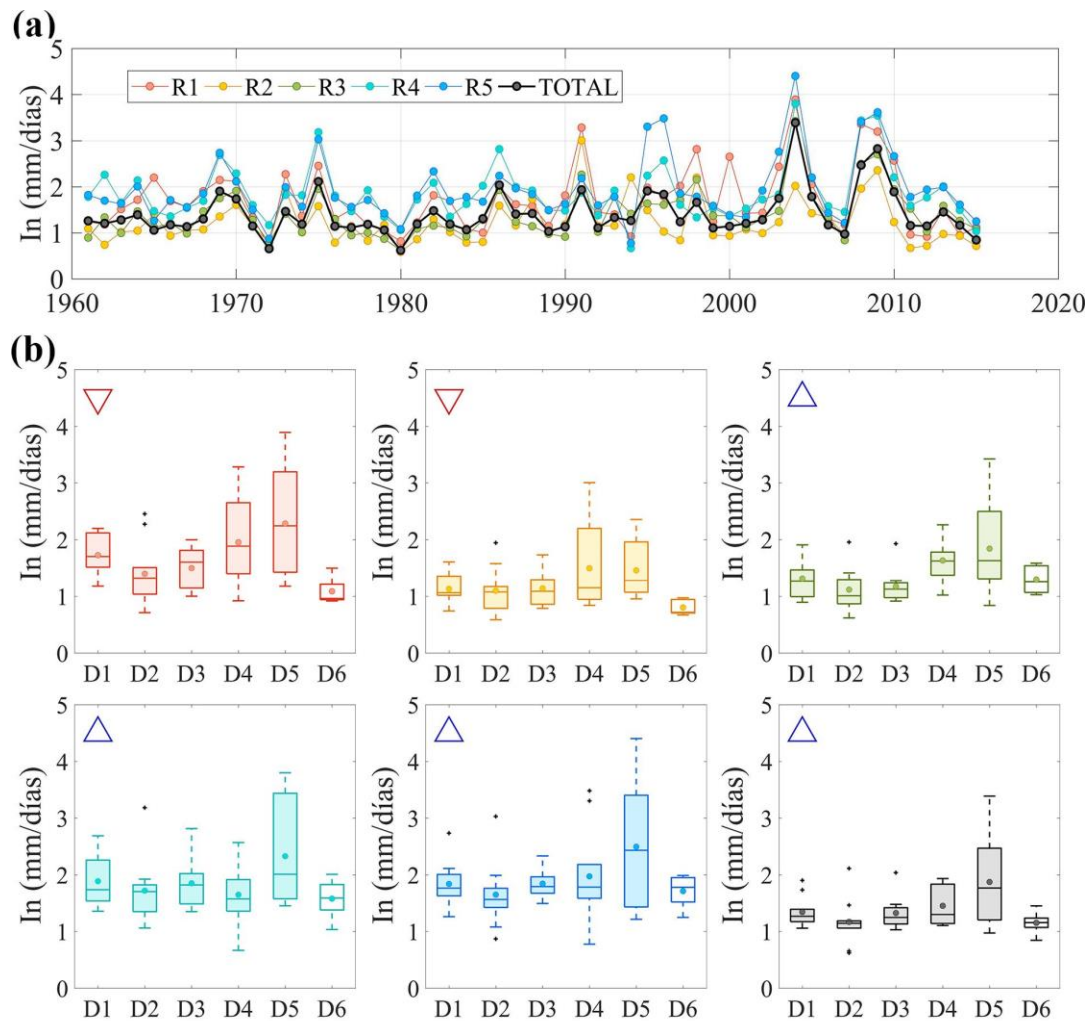


Figura 2.16 Evolución In: a) evolución anual; b) Evolución anual por décadas: R1, rojo; R2, naranja; R3, verde; R4, turquesa; R5, azul; Total, negro. Tendencia encontrada en cada uno de las estaciones a escala anual: Triángulo vértice hacia abajo (rojo): tendencia decreciente; Triángulo vértice arriba (azul): tendencia creciente. En ambos casos, la intensidad del color refleja las estaciones con tendencia estadísticamente significativa superior al 90%.

Tabla 2.10 Tabla resumen de los valores medios del índice In durante el periodo 1961-2015 en las regiones en las que se divide la zona de estudio (R1-R5) y todo el área analizada (Total) junto con las tendencias anuales asociadas. Los resultados del análisis de tendencias se definen según el test de Mann-Kendall como (1) significancia del $\alpha=0,01$ (**); (2) significancia del $\alpha=0,05$ (*); (3) significancia del $\alpha=0,1$ (+); o (4) sin significancia, $\alpha>0,1$ (+).

	In (mm/días)				
	Máxima	Media	Mínima	Desviación	Tendencia
ADRA (R1)	3,89	1,70	0,71	0,7	0,007 (+)
ANDARAX (R2)	3,00	1,22	0,58	0,5	0,003 (+)
FARDES (R3)	3,42	1,40	0,62	0,5	0,010 (*)
GENIL (R4)	3,79	1,86	0,66	0,6	0,003 (+)
GUADALFEO (R5)	4,40	1,93	0,77	0,7	0,010 (**)
TOTAL	3,38	1,40	0,62	0,45	0,007 (+)

A escala distribuida (Figura 2.17) al igual que para el IAp, valores nulos indican zonas sin ocurrencia de nieve. En lo que a evolución se refiere, valores superiores son encontrados para las regiones características del clima alpino. La R5 muestra los valores superiores de intensidad de nevadas con respecto al resto de regiones. Las zonas más vulnerables de nuevo son las cumbres, en las cuales la intensidad ha ido aumentando desde la D2 a la D5. Sin embargo, un decrecimiento de esta es obtenido en zonas de altas cotas para los 6 años analizados de la D6. La D6, aun no siendo una década intensa en cuanto a eventos de nieve se refiere, es la que mayor superficie de intensidad de la nieve arroja. De ahí, que los valores promedios analizados en la Figura 2.17 sean superiores. La variabilidad encontrada para esta variable en las distintas décadas pone de manifiesto la heterogeneidad a la que está expuesta la zona y como las zonas de transición son las más afectadas en términos de nieve. No obstante, a nivel general un decrecimiento de la intensidad es observado en las cumbres. Sin embargo, al igual que para la precipitación, el paso de los años se traduce en un mayor porcentaje de zonas con intensidad media de la precipitación en forma de nieve superior a 7mm/día.

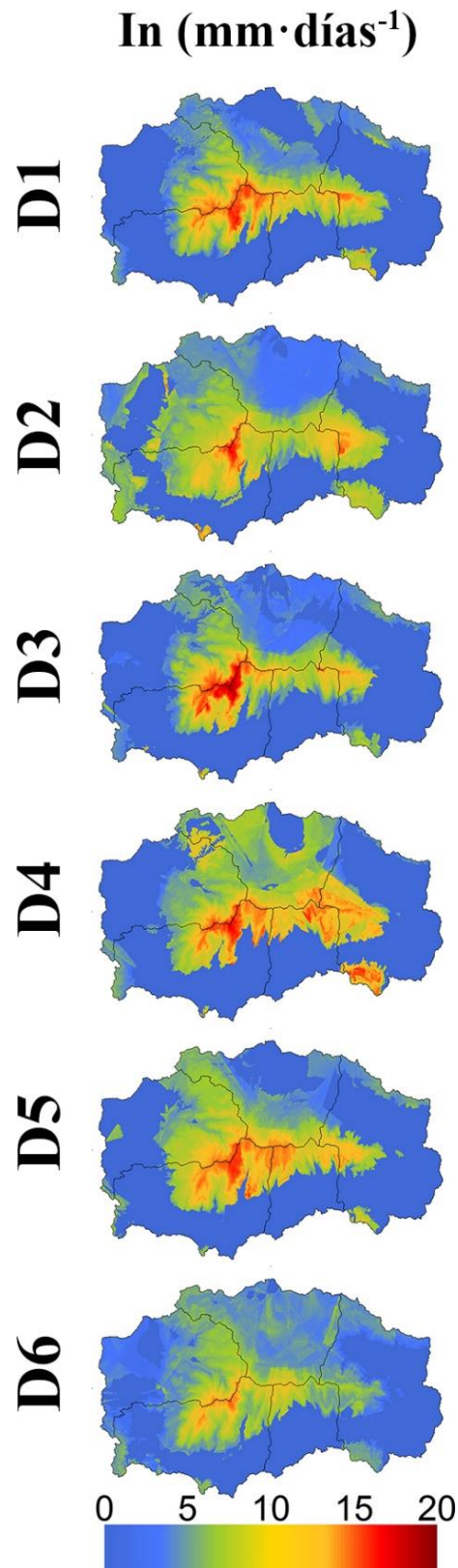


Figura 2.17 Distribución espacial del valor medio del índice de aridez, I_a , a escala de década (D1, 1961-1970; D2, 1971-1980; D3, 1981-1990; D4, 1991-2000; D5, 2001-2010; D6 incompleta, 2011-2015; años hidrológicos) para el periodo 1961-2015.

2.3.2.2 Escala evento

Índice de sequía de nieve (ISn), Temperatura (ITs), Humedad de nieve (IHn), e Intensidad asociada a IHn (IIHp)

En la Figura 2.18 se incluye la evolución anual durante el periodo de estudio 1961-2015 para la escala de evento. Con un valor medio de 6.2 días para toda el área de estudio, el IHn muestra una evolución decreciente. Esta disminución, en zonas características de presencia de nieve, suponen una implicación negativa en la precipitación en forma de nieve y por lo tanto un aumento del carácter árido en la nieve. Además, se asocian valores crecientes (tendencia de 0.017 mm/día) de la intensidad para dichos eventos, que a su vez resultan tres veces superiores a los encontrados en valor medio para todos los eventos de año analizado. Todo esto, junto con la tendencia creciente del número de días consecutivos secos de régimen de la nieve, confirman el aumento del carácter árido en el régimen de nieve.

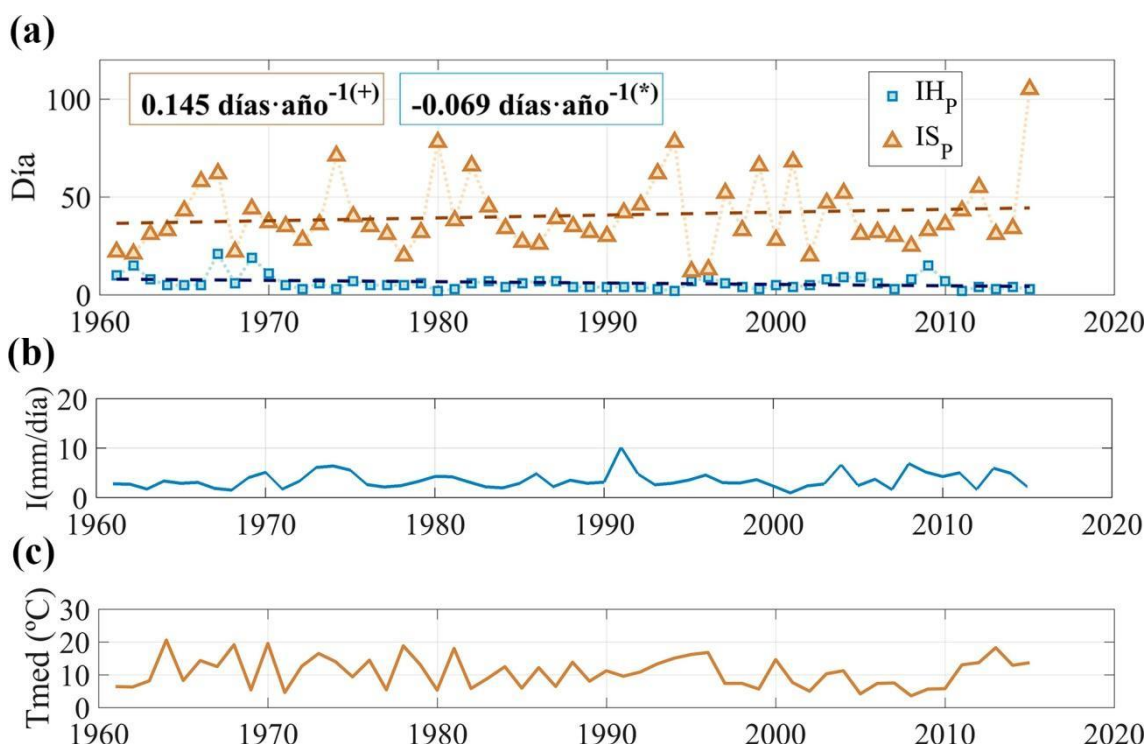


Figura 2.18 Evolución anual de los eventos extremos: a) índices ISn (marrón) y índice IHn (azul) b) la intensidad asociada al evento c) Tmedia asociada al evento durante el periodo 1961-2015 para todo el área de estudio.

2.4 Discusión

El análisis realizado de los ITyA para el área de estudio aporta una nueva visión acerca de la evolución de la dinámica de la nieve entre el periodo comprendido entre 1961-2015. De todos los índices explorados, el índice de aridez y el índice de intensidad, junto con el índice de días sin precipitación, y sus homólogos para la precipitación en forma de nieve, resumen las principales características de la evolución estimada del grado de aridez y de torrencialidad media en la zona de estudio. La Figura 2.19 representa la distribución por regiones de los valores anuales medios y la tendencia encontrada para todo el periodo de estudio de los índices seleccionados. En general, se puede concluir que la aridez está experimentando una evolución creciente en todas las regiones, junto con el número de días consecutivos sin precipitación al año, tanto para la precipitación total como para la de nieve. Sin embargo, existen diferencias en

cuanto al grado de significancia de las tendencias resultantes. La aridez referida a la nieve ha alcanzado tendencias (negativas) significativas solo para las regiones extremas del eje oeste-este, con valor mayor en toda la zona en la R4 (Genil); las regiones centrales muestran valores bajos que no alcanzan el nivel mínimo de confianza del 90% para la tendencia. En cuanto al número de días consecutivos sin precipitación, es en este caso el régimen de nieve el que muestra tendencia estadística al 90% en todas las regiones, con valores más elevados de incremento en las regiones con mayor influencia de la nieve, las regiones oeste y norte, mientras que esta significancia no se alcanza en las regiones este para el régimen de precipitación total.

Por último, el índice de intensidad de precipitación arroja tendencia, aunque sin significancia estadística al nivel marcado solo en dichas regiones norte y oeste, pero con signo cambiante desde disminución en el norte (R3) hacia el aumento en el sur (R5), y valores muy próximos a cero en las regiones este. Sin embargo, cuando se aplica a la precipitación en forma de nieve se aprecia tendencia ligeramente positiva (valores muy próximos a cero) en todas regiones y este resultado es significativo en dos de ellas, siendo una de estas la región Guadalfeo (R5).

El aumento de la aridez (Figura 2.19) está directamente relacionado con la tendencia decreciente de la precipitación (Figuras 1.7 y 1.25). No obstante, aunque la precipitación anual esté disminuyendo en términos medios, en las últimas décadas se han registrado los valores más extremos (máximos y mínimos) de estas variables. Este hecho pone de manifiesto una vez más la alta variabilidad existente en este tipo de zonas, en las que el clima de alta montaña está influenciado por las características del clima mediterráneo (Maheras et al., 1992; Buytaert *et al.*, 2006; Polade *et al.*, 2017).

El análisis conjunto de la torrencialidad media y el número de días consecutivos sin precipitación permite concluir que los eventos de precipitación total y en particular de nieve se están concentrando en determinadas épocas del año. Esto implica un impacto directo en el régimen hidrológico de la zona de estudio a escala global y local, especialmente y por motivos opuestos en las regiones extremas de aridez y de torrencialidad media (R2 y R5), tanto como precipitación total como en forma de nieve

No obstante, el análisis distribuido arrojó un aumento de la intensidad en zonas de cotas intermedias y un decrecimiento de la intensidad en las cumbres, de forma similar a la redistribución de precipitación de nieve discutida en el Capítulo 1. En cuanto a la estacionalidad, se ha observado (Figura 2.5) cómo las primeras precipitaciones del año y las últimas antes del periodo estival se están adelantando en cuanto a fecha se refiere, lo cual traduce en periodos secos más largos en otoño y en primavera, con implicaciones para el régimen hidrológico. Este análisis en la precipitación en forma de nieve (Figura 2.15), muestra cómo las primeras nevadas también tienden al retraso en las regiones con predominancia de nieve, lo que retrasa su acumulación inicial y afecta potencialmente al régimen de variables de estado de la capa de nieve como el espesor y la densidad; asimismo, las nevadas de primavera tienden a retrasarse lo cual genera su ocurrencia en periodos con aumento de temperatura y, con ello, mantos de nieve poco duraderos en relación a su ocurrencia más próxima al invierno. La acumulación invernal asimismo se ve retrasada; en las regiones R4 y R5, características por su presencia en nieve, la acumulación del 50-75% de la nieve anual, tiende al retraso pasando del mes de enero a finales de febrero.

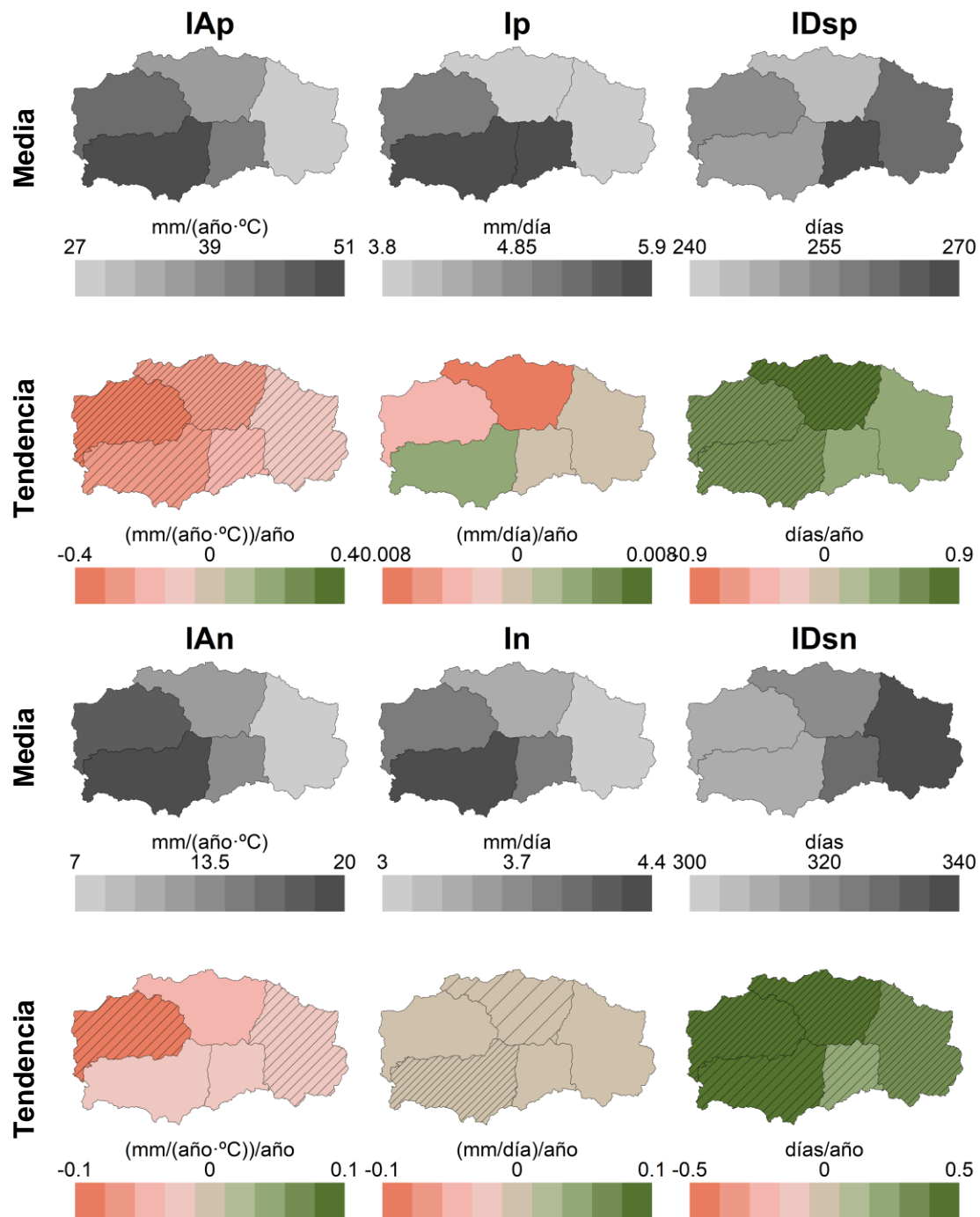


Figura 2.19 Distribución regional en Sierra Nevada de los valores medios en las variables analizadas junto con los valores de las décadas medias durante el periodo analizado 1961-2015.

Este comportamiento conjunto de aridez y torrencialidad media en Sierra Nevada se ha resumido en las Figuras 2.21 y 2.22, que muestran de forma conjunta los índices de aridez y torrencialidad para cada región a lo largo del periodo de estudio, expresados de forma adimensional utilizando su valor medio durante este periodo ($A^* = (A - A_{med}) / A_{med}$, siendo A en caso la índice representado; en este caso IA o I) tanto para la precipitación total (IAp* y Ip*) como para la precipitación en forma de nieve (IAn* y In*). En estos gráficos, el punto central (0,0) representa el comportamiento medio de

Sierra Nevada en su conjunto y las cuatro zonas delimitadas son combinaciones de torrencialidad y aridez relativas a dicho comportamiento global.

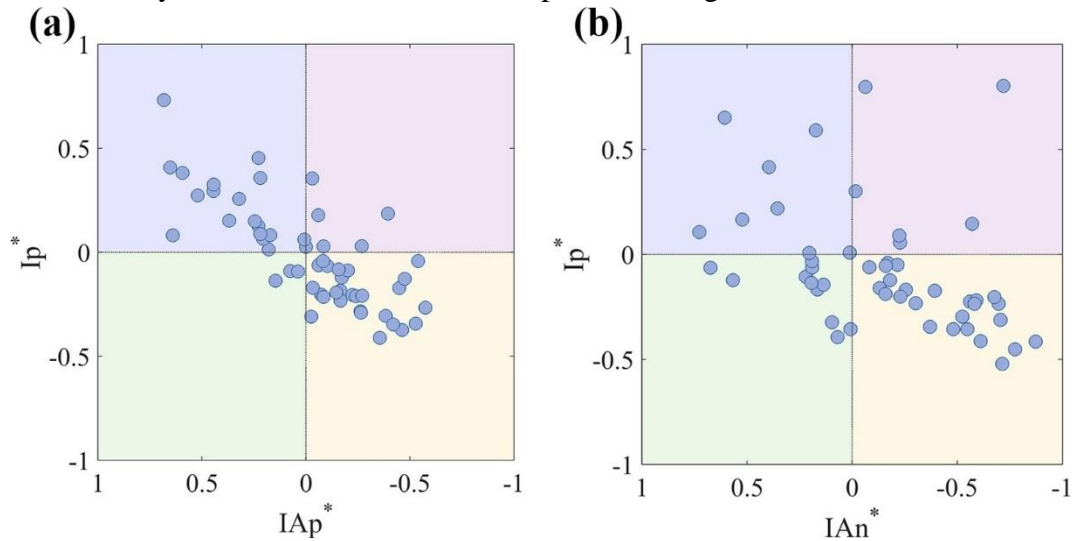


Figura 2.20 Condiciones de aridez (IA^*) vs condiciones de torrencialidad (I^*), para el régimen (a) precipitación (IA^* y Ip^*) y (b) precipitación en forma de nieve (IA^* y I_n^*) a escala anual en todo el área de estudio.

La Figura 2.21 muestra la posición de cada región a lo largo de los 55 años del estudio en dicha clasificación. Puede observarse la variabilidad relativa a escala anual en cada región y en conjunto, así como una concentración de los posibles estados en torno a una de las diagonales, si bien el carácter mixto torrencialidad-aridez presenta una dispersión menor y un comportamiento menos lineal en el caso de la precipitación total, y una mayor linealidad pero mayor dispersión en el caso de la precipitación en forma de nieve. El carácter individual de cada región queda también reflejado con dominancia de las regiones de nieve R4 y R5 en la parte izquierda de la nube de puntos.

No obstante, la elevada variabilidad anual del régimen de precipitación y temperatura requiere trabajar a otras escalas. La Figura 2.21 muestra dicha representación mixta a escala decenal y para todo el periodo de estudio de forma global. De nuevo, los resultados permiten establecer diferencias entre el régimen de precipitación total y en forma de nieve a lo largo de la zona de estudio y ratifican cuantitativamente la clasificación en regiones efectuada en el Capítulo 1, con las regiones R5 y R2 en las posiciones extremas en la zona a escala global del periodo de estudio para ambos regímenes, y con un comportamiento marcadamente lineal en la distribución de las regiones en el caso del régimen de precipitación en forma de nieve. Por otra parte, la distribución de las décadas en el periodo de estudio a escala global de la zona de estudio muestra un aparente patrón del régimen de precipitación total para las cinco primeras décadas, que se suceden en un ciclo ordenado temporalmente, con la última e incompleta década (2011-2015) desplazada. La información analizada no permite establecer mayor profundidad en este punto, y la posición final de la década seis una vez completa puede ser muy diversa; sin embargo, cabe señalar que dicho ciclo puede coincidir con una de las señales observadas en la dinámica de las manchas solares, con el periodo 2009-2010 identificado como mínimo local de actividad solar y la década actual como uno de los periodos con menor actividad registrada en el cómputo histórico (<https://www.spaceweatherlive.com/es/actividad-solar/ciclo-solar/ciclos-solares-historicos>). Este posible patrón cíclico a escala decenal no se observa en el caso de la precipitación en forma de nieve; sin embargo, la clasificación del carácter de aridez-torrencialidad de cada década es claramente diferente para precipitación total y de nieve en las décadas 1 y 5, las más extremas de la serie, y para el periodo transcurrido de la década 6. La

utilidad de esta representación a nivel comparativo es, en cualquier caso, clara y permite identificar con criterios objetivos las zonas más vulnerables en cuanto a la evolución posible de las condiciones de aridez y su impacto sobre la dinámica de la nieve a escala local.

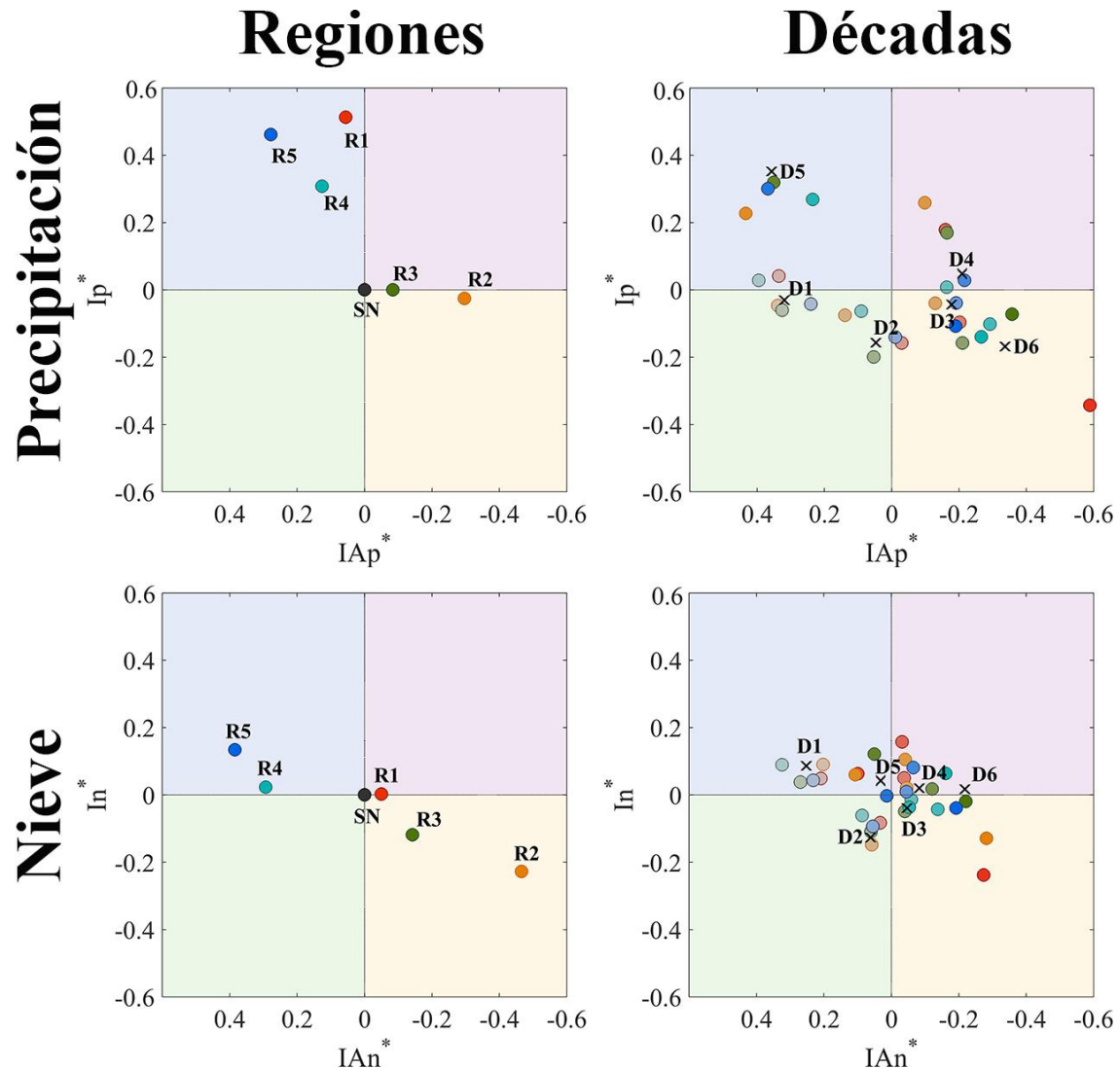


Figura 2.21 Condiciones de aridez (IA^*) vs condiciones de torrencialidad (I^*), para el régimen precipitación (IAp^* y Ip^*) (fila superior) precipitación en forma de nieve (IAn^* y In^*) (fila inferior) por regiones para todo el periodo (columna izquierda) y por décadas para cada región y para toda el área (aspas negras).

2.5 Conclusiones

Se han calculado un conjunto de índices en la zona de estudio a diferentes escalas espaciotemporales con el fin de caracterizar de forma cuantitativa las condiciones de aridez y torrencialidad media del régimen de la precipitación en forma de nieve y su comparación con el de precipitación total. Los resultados confirman la variabilidad espacial del comportamiento de la precipitación en forma de nieve y su caracterización, así como de las tendencias observadas para estos índices. De todos ellos, el índice de aridez y el índice de intensidad son los que aportan más información para clasificar de forma conjunta el carácter árido-torrencial de la zona de estudio a las escalas temporales significativas. El resto de índices han aportado información relevante sobre la estacionalidad del régimen de precipitación en forma de nieve. Las principales conclusiones obtenidas se pueden resumir de la forma:

- Índices relacionados con la precipitación:

La tendencia decreciente del índice de aridez, IAP ($-0.24 \text{ mm}/^{\circ}\text{C}/\text{año}$) junto con la disminución del número de días con precipitación consecutiva al año (-0.755 días/año), ponen de manifiesto y cuantifican el aumento de la aridez en la zona de estudio, con tendencias mayores con cotas crecientes a escala local. Por ello, a pesar de su menor valor de aridez, las cumbres son las zonas más afectadas por este cambio en todas las regiones delimitadas en la zona de estudio. La zona este y la cara norte de Sierra Nevada constituyen el área con mayor grado de aridez en la zona, y están sufriendo un proceso de homogeneización de sus condiciones que alcanza las cotas altas en el caso de la región de Andarax, al este.

A nivel global, se concluye que los primeros eventos de precipitación así como los últimos de primavera tienen una ocurrencia más temprana en el año hidrológico, con tendencias de -0.37 días/año y -0.32 días/año , si bien se aprecia un ligero aumento de la precipitación en agosto; puesto que la precipitación no está aumentando a escala anual, este cambio de estacionalidad genera una mayor duración de los periodos entre eventos y un impacto potencial sobre el régimen hidrológico más acusado.

- Índices relacionados con la precipitación en forma de nieve:

El estudio muestra un comportamiento tendente al incremento de la aridez de la nieve pero sin significancia estadística por la recuperación de precipitación en forma de nieve (a pesar del aumento de temperatura) durante la década D5 (2001-2010) y la década en curso en la actualidad. Esta recuperación supone un incremento elevado al final del periodo de estudio del índice de aridez de nieve en las regiones sur de Sierra Nevada (R5 y R1, Guadalfeo y Adra), que supera los niveles del inicio del periodo de estudio, que no se produce con tanta magnitud en las regiones norte (R4 y R3, Genil y Fardes), con la región Genil presentando tendencia significativa de aumento de aridez a escala anual.

El valor de la tendencia decenal a escala local de incremento de aridez es mayor en las zonas más bajas de la banda superior de cota en general; esto ocasiona una mayor vulnerabilidad del régimen de precipitación en forma de nieve en la región este de Sierra Nevada, Andarax (R2), que ha perdido en los últimos periodos representación de valores del IAn superiores a $40 \text{ mm}/^{\circ}\text{C}$, consolidando su carácter semiárido en la década en curso. Esta región también presenta tendencia significativa de aumento de aridez a escala anual. El número de días sin precipitación en forma de nieve presenta en esta región asimismo tendencia creciente significativa, frente al resto de regiones en la zona de estudio.

La disminución de la torrencialidad media de la precipitación (I_p) durante el periodo de estudio observada en la mayor parte de la zona de estudio a escala decenal, no se ve reflejada en su índice homólogo para la precipitación en forma de nieve, que sí aumenta en las regiones norte y oeste sobre todo en la década D5, con un incremento muy significativo frente a las décadas precedentes en la región menos árida, R5 (Guadalfeo).

La tendencia media global para toda la zona de estudio del número de días con precipitación en forma de nieve al año es decreciente (-0.5 días·año $^{-1}$); sin embargo, la torrencialidad media observada, I_n , muestra gran variabilidad para el periodo de estudio.

Los índices de torrencialidad de la nieve para diferentes percentiles a escala anual no muestran tendencias significativas al nivel de confianza mínimo marcado; sin embargo, se observa un retraso generalizado de las primeras nevadas a escala anual durante el periodo de estudio, más marcado en la región este, Andarax (R2), seguida de las regiones oeste (Guadalfeo y Genil, R5 y R4). Esto, unido al retraso de las últimas nevadas de primavera en las regiones oeste, genera una menor acumulación potencial y persistencia de dicha nieve dados los mayores valores de temperatura registrados en esa fase de la estación.

Los resultados permiten establecer una clasificación cuantitativa del carácter conjunto aridez-torrencialidad media para la precipitación y la precipitación en forma de nieve que confirman la zonificación cualitativa previamente efectuada, y ponen de manifiesto de forma clara la existencia de diferentes patrones del régimen de precipitación en forma de nieve en Sierra Nevada, con implicaciones para la vulnerabilidad de este carácter identitario de esta zona frente al calentamiento global y el impacto hidrológico.

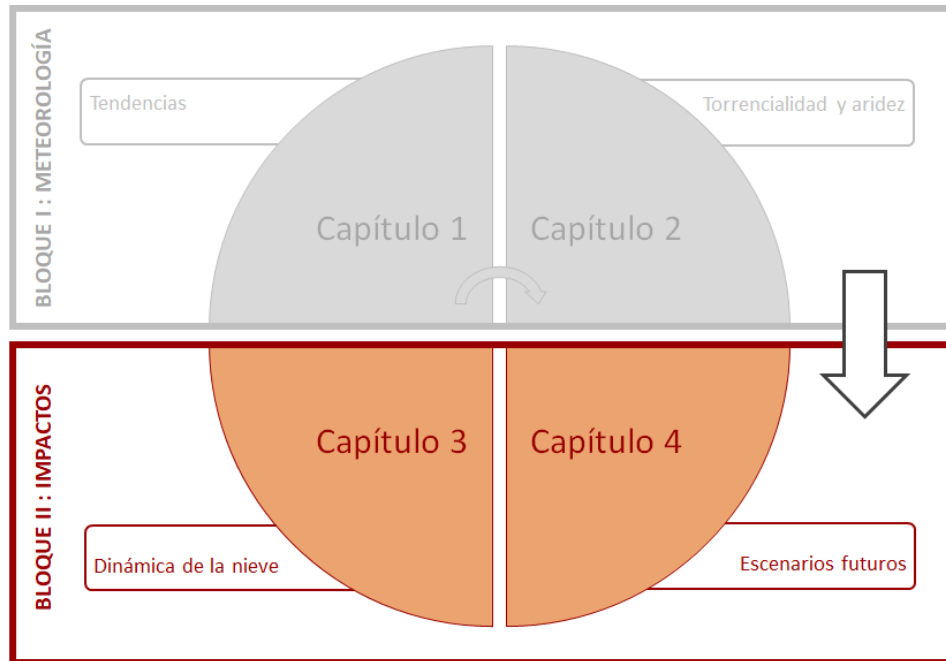
Conclusiones Bloque I

Las tendencias conjuntas del régimen de precipitación y temperatura a diferentes escalas temporales condicionan una gran heterogeneidad espacial de las condiciones que definen el dominio de la nieve en Sierra Nevada, que se traducen en diferentes patrones de acumulación de nieve y de periodos secos en función de la región considerada. Si bien la existencia de diferentes combinaciones de condiciones en esta zona es bien conocida, este trabajo ha identificado las zonas representativas de estos dominios y ha cuantificado y justificado sus descriptores en función de sus valores medios y de sus tendencias, incluyendo variables asociadas a la cantidad de nieve, a su ocurrencia, y a su carácter de aridez-torrencialidad media. El análisis de tendencias efectuado, aun con las limitaciones inherentes a la falta de registros meteorológicos durante periodos suficientemente amplios precisamente en las bandas de cota donde la nieve es más influyente, supone la primera base de datos con elevada resolución espacial que define los regímenes de precipitación, temperatura, aridez y torrencialidad media en una zona singular con un valor ambiental y cultural incalculable.

El impacto de las tendencias obtenidas del régimen de precipitación en forma de nieve, y su carácter, sobre el régimen hidrológico en las cuencas que se nutren de Sierra Nevada requiere analizar el balance de agua y energía en la capa de nieve y estimar el régimen de los flujos de agua desde la misma, esto es, fusión y evaporesublimación para poder evaluar la persistencia de la capa de nieve y su dinámica de acumulación-ablación. Los resultados muestran la vulnerabilidad de la zona frente al calentamiento global y destacan la necesidad de analizar la dinámica de la nieve en zonas semiáridas con una resolución espacial adecuada a cada escala temporal de relevancia para evitar conclusiones equivocadas.

BLOQUE II :
**Impacto de las tendencias climáticas observadas: influencia en
el régimen de los flujos de la nieves y evaluación de escenarios
futuros en Sierra Nevada**

El segundo bloque de la tesis se centra en evaluar los impactos de los regímenes meteorológicos (evolución, tendencias, aridez y torrencialidad) analizados en el Bloque I sobre los flujos de masa y energía en la capa de nieve. El bloque se divide en dos capítulos. En el primero, Capítulo 3, se analizan estos impactos en la dinámica de nieve para el periodo con observaciones disponibles (1961-2015). En el segundo, Capítulo 4, se evalúan los impactos en el periodo futuro (2006-2100) para ambos, regímenes meteorológicos y de la nieve, para dos escenarios de emisiones en base al quinto informe del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (AR5 - IPPC; IPCC, 2014).



CAPÍTULO 3: Impactos del régimen climático sobre la dinámica de la capa de nieve en Sierra Nevada

3.1 Introducción

En zonas de montaña, la capa de nieve juega un papel clave en el balance superficial de agua, constituyendo un embalse natural que modifica las dinámicas de precipitación-escorrentía (Kustas *et al.*, 1994; Wattanabe y Hitta, 1998; Stewards *et al.*, 2005; Mote *et al.*, 2005). Los ciclos de acumulación/ablación de nieve, condicionan la cantidad y el momento en el que por un lado el agua, entra a formar de la capa, y por otro aquellos en los que es devuelta al sistema en forma de agua líquida o vapor de agua, flujos de fusión y evaposublimación respectivamente (Herrero *et al.*, 2009).

En ambientes semiáridos, como la zona de estudio, el carácter extremo y altamente variable de los regímenes meteorológicos (Cudennec *et al.*, 2007; López-Moreno *et al.*, 2008) dotan a la capa de nieve de una dinámica muy particular en la que estos ciclos de acumulación/ablación no son únicos durante el año hidrológico y cuyo número puede variar considerablemente entre años hidrológicos (Pimentel *et al.*, 2015); además, de una distribución espacial heterogénea (Pimentel *et al.*, 2017a, b), condicionada principalmente por el relieve y su interacción con los procesos dominantes en cada etapa de proceso de acumulación/ablación (Elder *et al.*, 1991; Marks y Winstral, 2001). Conocer la dinámica de estos flujos de agua en la capa de nieve (evolución, reparto, distribución) por tanto constituye un aspecto clave en la gestión de recursos hídricos, especialmente en zonas mediterráneas.

En este contexto, el objetivo de este capítulo es analizar el impacto de la evolución observada en los regímenes meteorológicos sobre los flujos de agua y energía en la capa de nieve y sus dinámicas el área de estudio durante el periodo de análisis (1961-2015) (Bloque I) en la dinámica de la nieve, en particular, sobre el reparto entre los flujos de masa, fusión y evaposublimación en el área de Sierra Nevada.

3.2 Metodología

Se analizan tres aspectos relativos a la dinámica de la capa nieve: flujos de agua desde la capa de nieve (fusión y evaposublimación), volumen de agua y persistencia de la capa nieve. El análisis se realiza a tres escalas temporales: década, año y mes; y de manera distribuida, tanto a escala promediada en todo el área, como completamente distribuida (30m x 30m). Para esta última escala espacial sólo se calculan los flujos de masa y la persistencia de la capa de nieve, quedando el volumen de agua analizado indirectamente a través de ellos. En total son 6 las variables analizadas que quedan definidas como:

- **Fusión anual/mensual (F)**, flujo de fusión diaria acumulado a escala anual/mensual.
- **Evaposublimación anual/mensual (E)**, flujo de evaposublimación diaria acumulado a escala anual/mensual.
- **Equivalente de agua medio (EAméd)**, media anual/mensual del equivalente de agua diario.
- **Equivalente de agua máximo (EAmáx)**, máximo anual/mensual del equivalente de agua diario.

- **Superficie cubierta de nieve media anual/mensual (SCNmed)**, media anual/mensual de la fracción de nieve por unidad de área diaria.
- **Días al año/mes con nieve en Superficie (DíasNS)**.

En el caso del análisis a escala de década se muestran las distribuciones de los valores anuales correspondientes a cada década analizada, no valores agregados a esta escala. Todas las variables son calculadas con el módulo de nieve SNOWMED del modelo hidrológico WiMMed (ver sección *Modelado distribuido de la dinámica de la nieve en Sierra Nevada*), para el periodo 1961-2015, utilizando como datos de entrada meteorológicos los analizados en el Bloque I de este trabajo.

La evolución temporal y los estadísticos principales son calculados para cada una de las variables descritas para cada una de las escalas espaciotemporales. Al igual que en los capítulos anteriores la detección de tendencias estadísticas, se realiza mediante el test de Mann-Kendall (Gibbons y Chakraborti, 2011).

3.3 Resultados

3.3.1 Flujos de masa: Fusión y evaposublimación

Evolución a escala de década

La Figura 3.1 muestra la evolución de las cinco décadas completas analizadas y los 6 primeros años de la década comprendida entre 2010-2020. No se puede hablar de tendencias a escala de década, sin embargo, sí de una evolución decreciente de la fusión de nieve y creciente para la evaposublimación. Los valores promedio de ambas variables muestran una evolución decreciente asintótica en las cuatro primeras décadas con un valor medio mínimo a escala decenal en dicha década, con valores de 22 mm/año y 6 mm/año para fusión y evaposublimación, respectivamente. Es en esta década además donde comienza a observarse una mayor variabilidad entre años, teniendo el mayor rango intercuartílico de las cuatro primeras décadas analizadas. Por el contrario, esta evolución decreciente finaliza en la D5, década más extrema con valores medios a escala decenal 45 mm/año y 16 mm/año para fusión y evaposublimación respectivamente. La D6, aunque no completa, muestra de nuevo valores más cercanos a las décadas anteriores, obteniendo para fusión el mínimo valor medio de todo el periodo analizado, pero no así para la evaposublimación, la cual en término medio sigue estando por encima de cualquiera de las medias observadas para las cuatro primeras décadas.

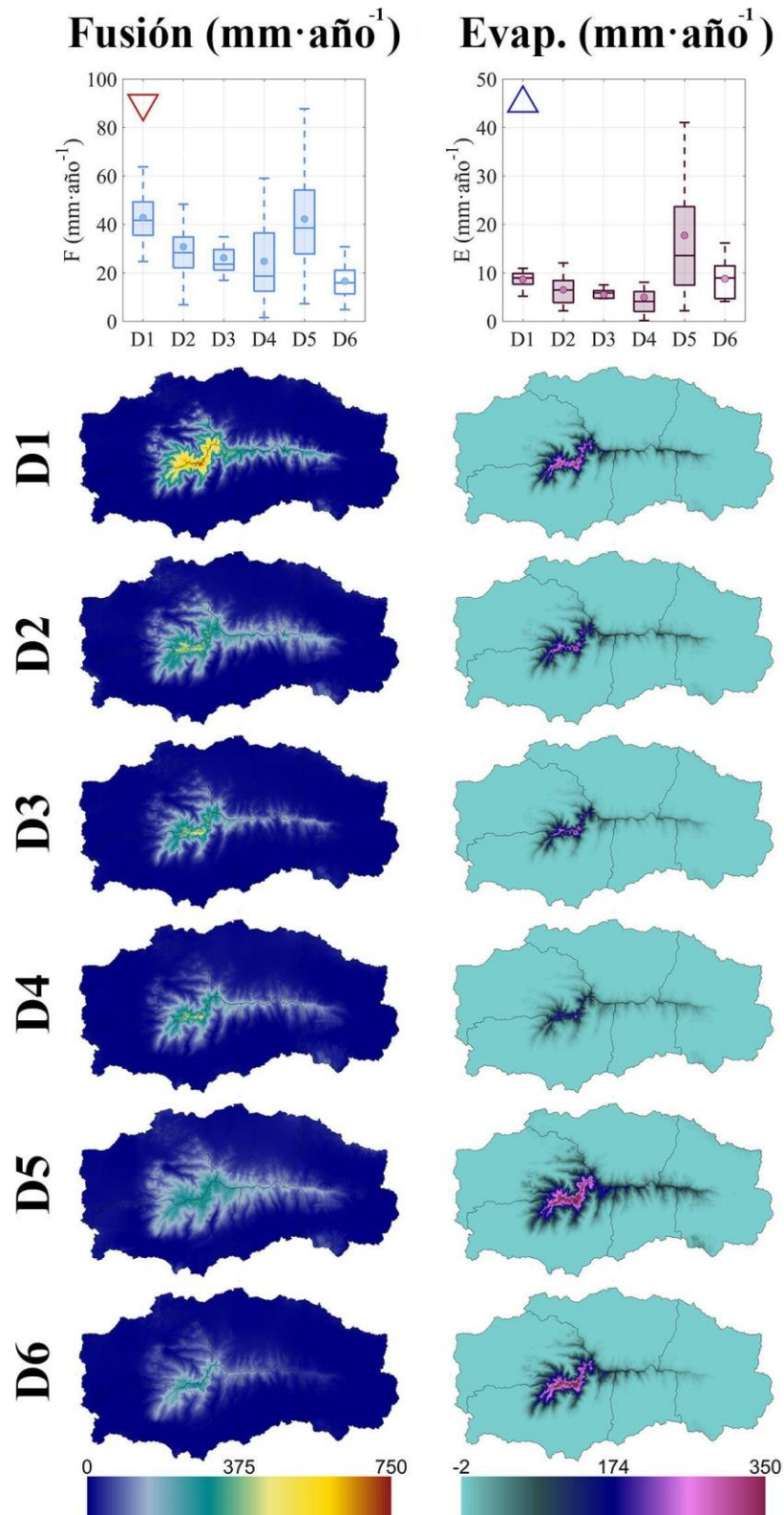


Figura 3.1 Valores distribuidos y promediados de las variables indicadoras del régimen de la nieve: Fusión y evaporesublimación a escala decenal en el periodo analizado comprendido entre 1961-2015.

Los valores distribuidos anuales medios por década, muestran un comportamiento similar al observado en el análisis global. La evolución decreciente es clara para las cuatro primeras décadas, siendo D5 una década anómala para la fusión y marcando un cambio en la evolución en la evaporesublimación. Los valores más elevados en ambas variables aparecen en las cumbres,

especialmente en aquellas regiones con mayor presencia de nieve, R4 y R5 (Genil y Guadalfeo). En las regiones más al este, R1, R2 y R3 (Adra, Andarax y Fardes) la variabilidad observada entre décadas es mucho menor, como cabría esperar debido a su carácter árido en términos níveos.

Evolución a escala anual

La Figura 3.2 representa la evolución de los flujos de masa en la capa de nieve, fusión y evaposublimación en el periodo de referencia 1961-2015 para la zona de estudio. Para este periodo se observa una tendencia decreciente con significancia estadística $\alpha = 0.05$ de -0.204 mm de pérdida al año para el flujo de fusión. Por el contrario, no se encuentra tendencia en el caso de la evaposublimación, pero sí una evolución creciente. Este comportamiento cambia, si el análisis se finaliza en el año hidrológico 1994-1995, año más seco de toda la serie analizada. En ese caso ambos flujos mostrarían una evolución decreciente, al igual que antes sólo significativa para la fusión. Es a partir de ese momento, cuando el flujo de evaposublimación comienza a adquirir unos valores superiores a los observados hasta ese momento. Aumentando su importancia relativa en relación al término de fusión. La importancia relativa entre ambos flujos es mostrada utilizando las variables, F^* y E^* , calculadas como el cociente entre los flujos F y E , y la suma de ambos (Figura 3.3). Se observan tres periodos de aproximadamente 20 años en la evolución de esta variable. Un primer periodo, dos primeras décadas, en el que esta relación es prácticamente constante con un valor para F^* 0.8 mm/mm, seguido de otro periodo con valores medios similares pero mayores fluctuaciones respecto a este valor, en torno a 0.1 mm/mm, y una pequeña tendencia creciente; y, finalmente un periodo con una clara tendencia decreciente.

Los mapas distribuidos medios anuales (Figura 3.2 a) muestran, al igual que en los valores promedios, como en términos generales la pérdida por fusión (Figura 3.2b) es superior para la evaposublimación (Figura 3.2e), con valores máximos en las zonas de cumbre para ambas variables y una importancia relativa más alta de la evaposublimación frente a la fusión en las cumbres que en cotas más bajas. Esto queda reflejado en las tendencias distribuidas observadas, las cuales indican que las zonas próximas a las cumbres es donde se localizan las mayores pérdidas de fusión (Figura 3.2c) y por el contrario ganancias de la evaposublimación (Figura 3.2f). Cabe señalar también la presencia de tendencias positivas en las zonas de transición - áreas en cotas bajas en las que la presencia de nieve es muy variable entre años - en la cara sur, R1 y R5 (Adra y Guadalfeo). Por tanto, son estas zonas, junto con las cumbres, aquellas que están experimentando una mayor vulnerabilidad a los cambios. Tendencias y desviaciones son cercanas a 0 para las regiones y cotas en los que la presencia de nieve es limitada.

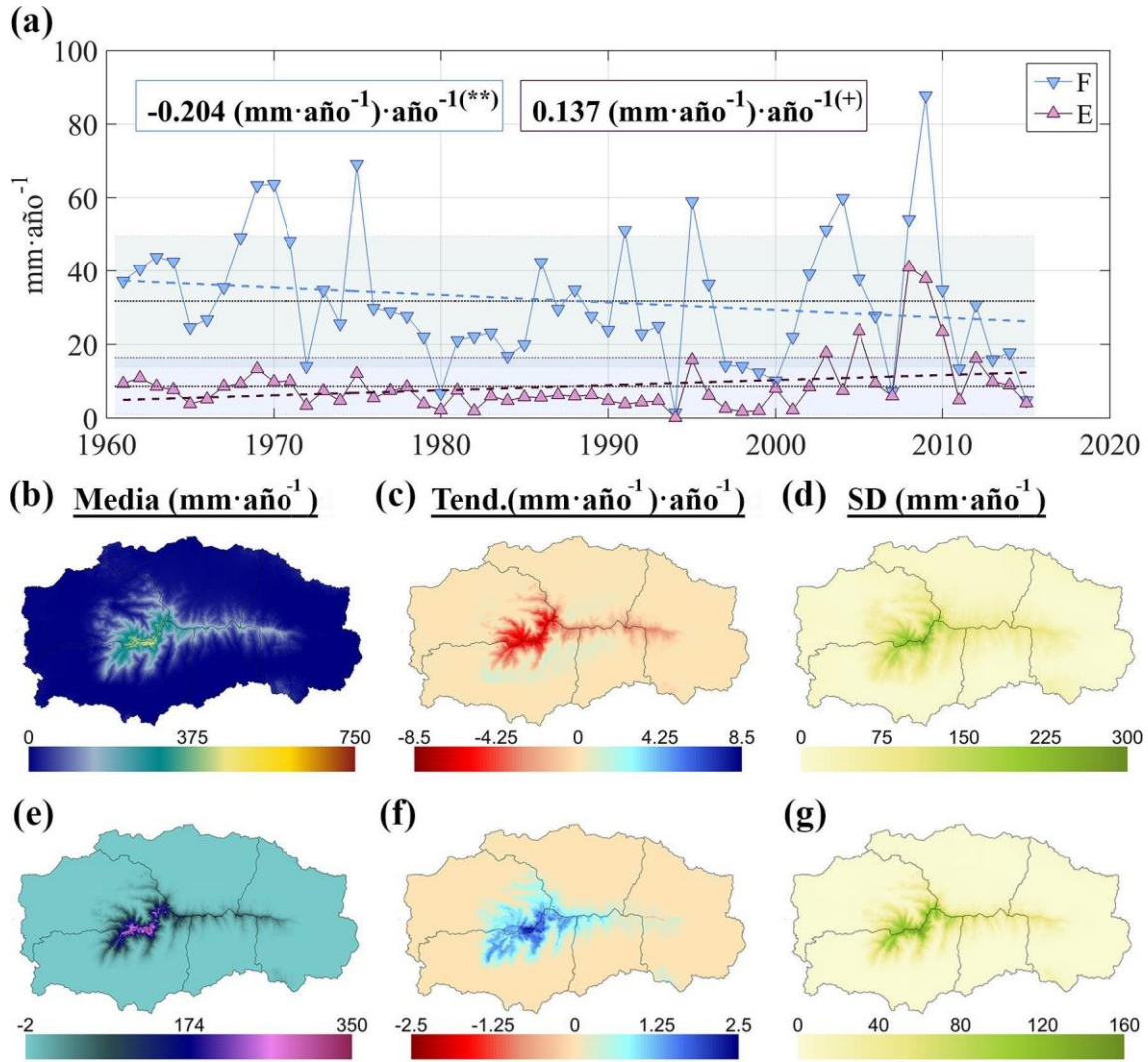


Figura 3.2 (a) Evolución de los flujos de nieve fusión (azul) y evaposublimación (violeta) anual en el periodo 1961-2015 promediada en el área de estudio: línea discontinua: evolución; línea continua: valor medio del periodo de estudio; área sombreada: desviación típica de la variable. (b) mapa distribuido del valor medio de fusión anual. (c) tendencias distribuidas en el área de estudio para la fusión (d) mapa de la desviación típica distribuida para la fusión de nieve en el periodo de estudio 1961-2015. (e) mapa distribuido del valor medio de la evaposublimación anual. (f) tendencias distribuidas en el área de estudio para la evaposublimación. (g) mapa de la desviación típica distribuida para la evaposublimación en el periodo de estudio 1961-2015.

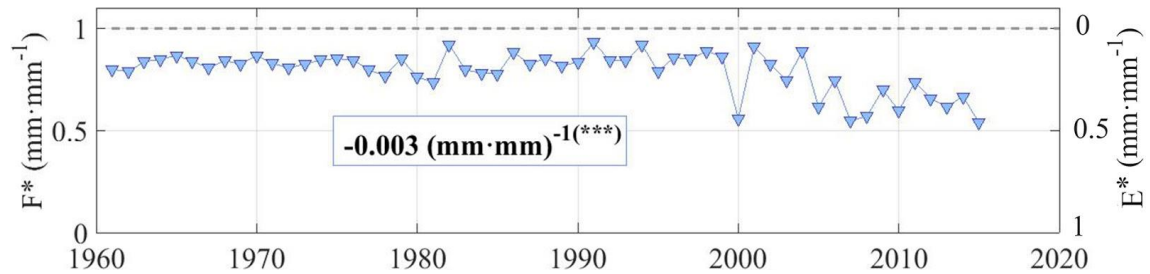


Figura 3.3 Evolución de la variable F^* flujos de nieve fusión (azul) y evaposublimación (violeta) anual en el periodo 1961-2015 promediada en el área de estudio: línea discontinua: evolución; línea continua

Si esta información se agrega a escala de regiones (

Tabla 3.1), se observa como los menores valores medios de fusión y evaposublimación se encuentran en la región más al este, 11.7 $\text{mm}/\text{año}$ y 222 $\text{mm}/\text{año}$, R2 (Andarax) región con un

régimen de pluviometría de la nieve más árido y los más altos en R5 (Guadalfeo), 48.4 mm/año y 16.6 mm/año, región sin carácter árido en el régimen de precipitación de la nieve. En el resto de las regiones, cabe señalar que la similitud encontrada en los valores medios de fusión entre las regiones R1 (Adra) y R3 (Fardes) no queda reflejado en el flujo de evaposublimación, donde los valores medios difieren aproximadamente un 30%. A pesar de ser R3 (Fardes), la región más fría, su régimen más árido en cuanto a precipitación en forma de nieve parece condicionar el reparto entre flujos de masa. Un comportamiento similar pero menos acentuado puede observarse entre R4 (Genil) y R5 (Guadalfeo), en las que los valores medios de los flujos fusión son muy similares, pero no así los de evaposublimación.

Tabla 3.1 Estadísticos de la fusión y la evaposublimación de la nieve para cada región (R1-R5) y para todo el área de estudio (Total), junto con las tendencias medias anuales obtenidas durante el periodo analizado 1961-2015. Los resultados del análisis de tendencias se definen según el test de Mann-Kendall como (1) significancia del $\alpha = 0,01$ (**); (2) significancia del $\alpha = 0,05$ (*); (3) significancia del $\alpha = 0,1$ (*); o (4) sin significancia, $\alpha > 0,1$ (+).

Fusión(mm/año) [Hm ³ /año]					
	Máxima	Media	Mínima	Desviación	Tendencia
ADRA (R1)	74,8 [34,3]	25,4 [11,7]	0,6 [0,3]	17,8	-0,07 ⁽⁺⁾
ANDARAX (R2)	46,2 [54,1]	11,7 [13,8]	0,7 [0,8]	9,8	-0,05 ⁽⁺⁾
FARDES (R3)	87,2 [79,7]	25,0 [22,9]	2,1 [1,9]	16,2	-0,03 ⁽⁺⁾
GENIL (R4)	110,6 [108,7]	46,9 [46,1]	1,6 [1,6]	25,7	-0,53 ^(***)
GUADALFEO (R5)	121,6 [128,7]	48,4 [51,2]	1,6 [1,7]	27,0	-0,27 ^(**)
TOTAL	87,7 [402,2]	31,7 [145,7]	1,4 [6,7]	17,8	-0,20 ^(**)
Evaposublimación (mm/año) [Hm ³ /año]					
	Máxima	Media	Mínima	Desviación	Tendencia
ADRA (R1)	39,8 [18,3]	5,1 [2,3]	0,04 [0,02]	7,3	0,11 ⁽⁺⁾
ANDARAX (R2)	16,6 [19,4]	2,2 [2,6]	0,00 [0,00]	2,9	0,03 ⁽⁺⁾
FARDES (R3)	21,8 [19,9]	3,4 [3,1]	0,03 [0,03]	3,9	0,06 ⁽⁺⁾
GENIL (R4)	56,9 [55,9]	14,2 [14,0]	0,31 [0,30]	10,7	0,19 ⁽⁺⁾
GUADALFEO (R5)	71,9 [76,2]	16,6 [17,6]	0,27 [0,28]	14,4	0,27 ⁽⁺⁾
TOTAL	41,0 [188,0]	8,6 [39,5]	0,13 [0,2]	7,7	0,13 ⁽⁺⁾

Evolución a escala mensual

Al igual que ocurría para la distribución mensual de la precipitación en forma de nieve, desde junio hasta octubre los valores de los flujos de masa asociados a la capa de nieve son prácticamente nulos (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). Los valores medios máximos para el flujo de fusión se encuentran para los meses de invierno y febrero, con valores prácticamente iguales; encontrando el máximo valor medio para el flujo de evaposublimación en febrero. Sólo se encuentra tendencia creciente con un nivel de significancia $\alpha = 0.1$ en el mes de enero para el caso del flujo de evaposublimación. Este hecho puede estar atribuido al desplazamiento que están experimentando la distribución mensual de la precipitación en forma de nieve, la cual presenta una tendencia decreciente significativa en diciembre, que hace que la evolución de estas en los meses de enero sea creciente pero no significativa (ver sección 1.3.3.2). Por último, señalar la tendencia significativa decreciente para los meses de primavera y verano para ambos flujos.

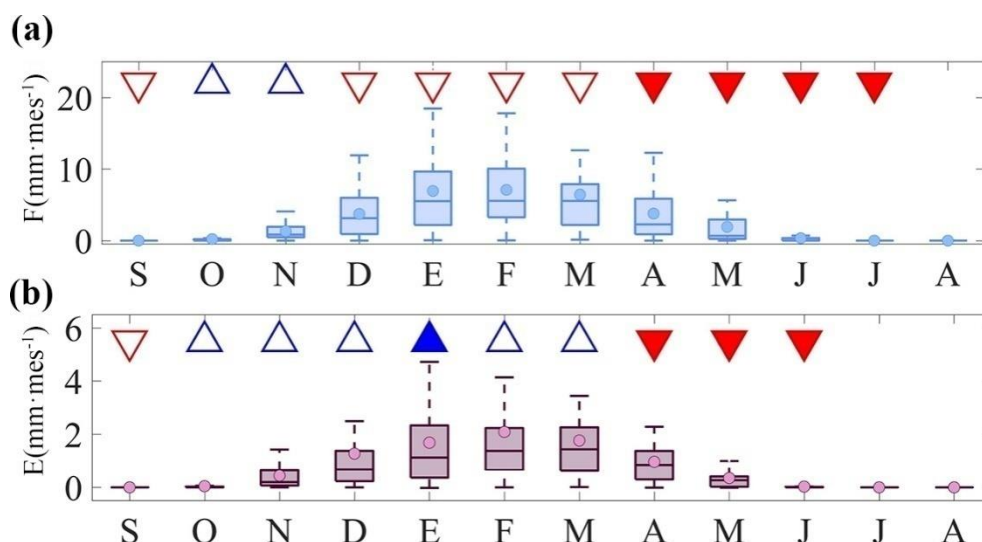


Figura 3.4 Diagrama de cajas sobre la evolución de la dinámica de la nieve: a) Fusión acumulada mensual; b) Evaposublimación acumulada mensual; Triángulo azul: evolución creciente, triángulo rojo: evolución decreciente. En ambos casos, la intensidad del color refleja las estaciones con tendencia estadísticamente significativa con un nivel de confianza superior al 90%.

3.3.2 Volumen: Equivalente de agua

Evolución a escala anual

Las dos variables analizadas dan una idea del volumen de agua acumulada en la capa de nieve. EA_{med} representa el volumen medio a lo largo del año, el cual varía entre los 2.2 y los 14 mm, equivalentes a 9.9 y 45,1 hm^3 (Figura 3.5). EA_{max} representa el volumen máximo alcanzado durante el año, el cual ocurrirá en días independientes dependiendo del año y cuyos valores oscilan entre los 9 y los 44 mm, equivalentes a 41.1 y 201,3 hm^3 . Las tendencias para ambas variables en el período de estudio son significativas y decrecientes con pérdidas de 0.045 $mm \cdot año^{-1}$ y 0.076 $mm \cdot año^{-1}$ para EA_{med} y EA_{max} , respectivamente. Al igual que para el resto de variables analizadas los últimos 20 años son los que muestran una mayor variabilidad.

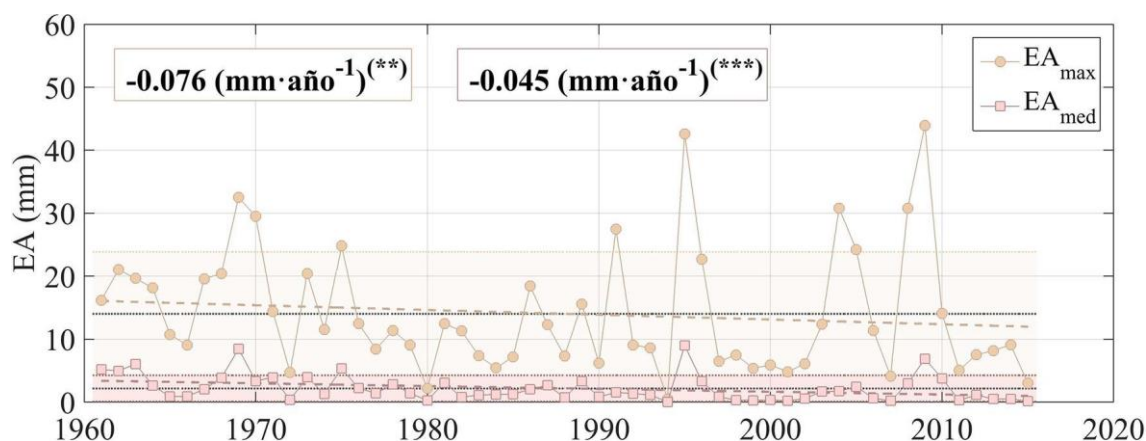


Figura 3.5 (a) Evolución del Equivalente de agua medio (rosa) y máximo (ocre) anual en el periodo 1961-2015 promediada en el área de estudio; línea discontinua: tendencia de la evolución; línea continua: valor medio del periodo de estudio; área sombreada: desviación típica de la variable.

La escala de región (Tabla 3.2), se observa la clara distinción entre regiones en función de su aridez. Son R4 (Genil) y R5(Guadalefe) las que más agua almacenan con valores medios de 4.6 mm y 3.8 mm, equivalentes a 4,6 y 4,0 hm^3 , respectivamente, siendo valores prácticamente nulos los observados en el resto de las regiones. La evolución de EA_{med} por regiones refleja

tendencias decrecientes significativas en todas ellas, siendo especialmente acentuada en la R4 (Genil), con -0.11 mm/año . En el caso de EA_{\max} la significancia estadística decreciente sólo aparece en las regiones menos áridas.

Tabla 3.2 Estadísticos de las variables de equivalente de agua en la capa de nieve para cada región (R1-R5) y para todo el área de estudio (Total), junto con las tendencias medias anuales obtenidas durante el periodo analizado 1961-2015. Los resultados del análisis de tendencias se definen según el test de Mann-Kendall como (1) significancia del $\alpha=0,01$ (**); (2) significancia del $\alpha=0,05$ (*); (3) significancia del $\alpha=0,1$ (*); o (4) sin significancia, $\alpha>0,1$ (+).

$EA_{\text{med}}(\text{mm}) [\text{Hm3}]$					
	Máxima	Media	Mínima	Desviación	Tendencia
ADRA (R1)	(3,7) [1,7]	(0,6) [0,3]	(0,00) [0,00]	0,82	-0,002(**)
ANDARAX (R2)	(2,1) [2,5]	(0,3) [0,3]	(0,00) [0,00]	0,39	-0,003(**)
FARDES (R3)	(3,1) [2,8]	(0,8) [0,7]	(0,00) [0,00]	0,78	-0,01(***)
GENIL (R4)	(19,0) [18,7]	(4,6) [4,6]	(0,02) [0,02]	4,33	-0,11(***)
GUADALFEO (R5)	(19,6) [20,7]	(3,8) [4,0]	(0,02) [0,01]	4,03	-0,07(***)
TOTAL	(8,9) [41,1]	(2,2) [9,9]	(0,01) [0,04]	2,12	-0,04 (***)
$EA_{\max}(\text{mm}) [\text{Hm3}]$					
	Máxima	Media	Mínima	Desviación	Tendencia
ADRA (R1)	(40,0) [18,4]	(10,9) [4,6]	(0,12) [0,05]	10,01	0,03(+)
ANDARAX (R2)	(36,6) [42,8]	(5,2) [6,8]	(0,43) [0,50]	5,82	$-7,87 \cdot e^{-4}(+)$
FARDES (R3)	(32,7) [29,9]	(9,2) [6,9]	(1,02) [0,93]	7,51	0,03(+)
GENIL (R4)	(65,1) [64,0]	(23,7) [15,5]	(0,45) [0,44]	15,79	-0,28(***)
GUADALFEO (R5)	(91,6) [96,9]	(23,3) [19,1]	(0,54) [0,57]	18,10	-0,10(**)
TOTAL	(43,9) [201,3]	(14,0) [45,1]	(0,52) [2,38]	9,83	-0,07(**)

Evolución a escala mensual

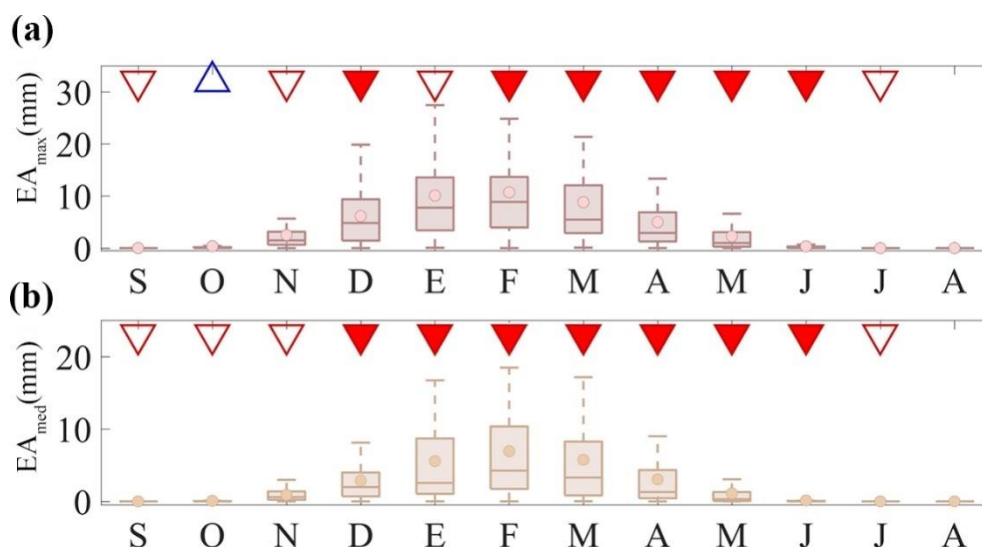


Figura 3.6 Diagrama de cajas sobre la evolución de la dinámica de la nieve: a) Equivalente de agua máximo mensual; b) Equivalente de agua medio mensual; Triángulo azul: evolución creciente, triángulo rojo: evolución decreciente. En ambos casos, la intensidad del color refleja la estaciones con tendencia estadísticamente significativa con un nivel de confianza del 90%.

A escala mensual, al igual que con el resto de variables dependientes del régimen de precipitación en forma de nieve, quedan definidos los meses en los que la influencia de la nieve es significativa (Figura 3.6). La distribución para ambas variables es muy parecida, siendo algo más oscilantes los valores en el caso de EA_{\max} . En cuanto a los valores medios máximos, para ambas variables estos aparecen en febrero, marcando este como el mes en el que en término medio la cantidad de agua en la capa de nieve es mayor, con un EA_{med} de 7,5 mm equivalentes

a 34.4 hm^3 y que suponen un 76.3% sobre el valor medio anual en el periodo. El patrón de evolución decreciente observada a escala global, es observado aquí para todos los meses, siendo además significativo ($\alpha = 0.1$) con excepción de el mes de enero para EA_{\max} .

3.3.3 Persistencia

La persistencia de la capa de nieve es analizada utilizando las variables DíasNS y SCN, al tratarse de dos variables íntimamente relacionadas, se decide mostrar exclusivamente la primera, DíasNS a escala completamente distribuida.

Evolución a escala de década

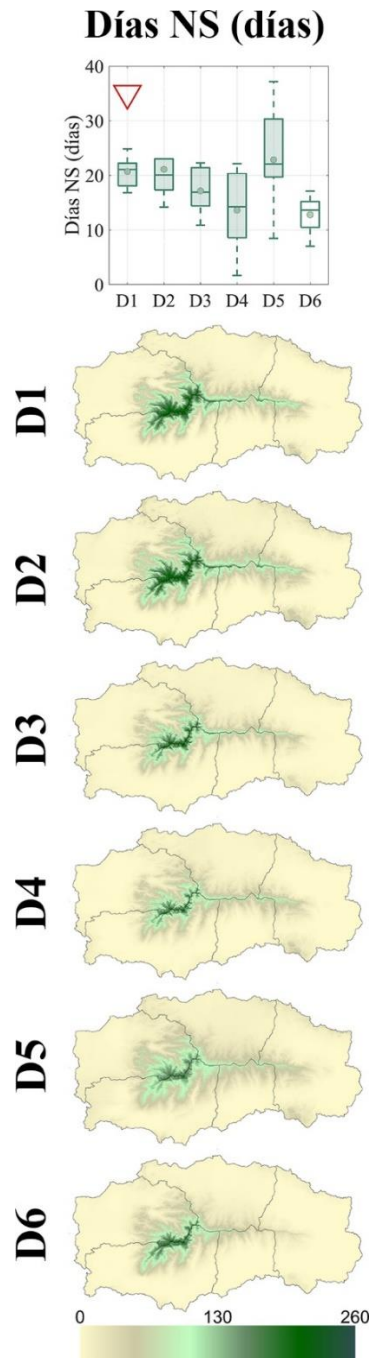


Figura 3.7 Valores distribuidos y promediados de la variable indicadora de la persistencia del régimen de la nieve días con nieve en superficie a escala decenal en el periodo analizado comprendido entre 1961-2015.

La Figura 3.7 muestra la evolución de la variable días con nieve en superficie (DíasNS) para las 6 décadas analizadas. Esta evolución no muestra una tendencia a escala decenal, sin embargo, sí una evolución decreciente. Dicha evolución decreciente es muy pequeña en las tres primeras décadas, experimentando un gran descenso en D4 y viéndose truncada en la década D5, la cual llega a alcanzar valores máximos cercanos a los 40 días a escala promedio en toda el área. Es en esta además donde se observa una gran variabilidad, con valores mínimos cercanos a los observados en décadas anteriores, 8 días. La D6, aunque no completa, muestra por el contrario valores menores a los observados en décadas anteriores, con media en torno a los 12 días.

Los valores distribuidos anuales medios por década de la variable DíasNS (Figura 3.7), muestran un comportamiento similar al observado en el análisis de los flujos de masa en la capa de nieve. La evolución decreciente es clara para las cuatro primeras décadas. Se observa cómo a pesar de poseer un área cubierta similar, el número de días en las cumbres experimenta un acusado descenso. En la D5, el crecimiento experimentado, no se experimenta en las cumbres, los valores y distribución son muy parecidos a los de la D5, sin embargo, si lo hacen en extensión, aumentando el número de días con nieve en superficie en cotas bajas. La D6, vuelve a mostrar valores similares, aunque algo más bajos, a los observados para las décadas iniciales analizadas las regiones al oeste R4 y R5 (Genil y Guadalfeo), pero manteniendo patrones de distribución parecidos a los observados para la D5 en estas regiones. Sin embargo, se observa un cambio muy brusco de reducción del número de días en las regiones del este R1, R2 y R3 (Adra, Andarax y Fardes), con valores que medios que no superan los 8 días en ninguna de las regiones.

Evolución a escala anual

La Figura 3.8 muestra el análisis de la persistencia de la capa de nieve, tanto en términos de número de días con nieve en superficie (DíasNS) como de superficie cubierta de nieve media anual (SCN). Ambas variables están directamente relacionadas y muy condicionadas por la evolución de la precipitación en forma de nieve (Figura 3.8c) observándose patrones de comportamiento muy similares entre las tres variables. En el caso de DíasNS, con una media de 18.5 días con precipitación en forma de nieve en superficie a lo largo del periodo analizado. La evolución observada es decreciente no significativa y podría suponer un total de 4.34 días de pérdida de nieve en superficie en promedio para toda el área analizada. La variable presenta una gran variabilidad que oscila entre los 1.6 y los 37.1 días para años con menos y más días de nieve en superficie. Por otro lado, la SCN refleja una evolución igualmente decreciente pero en este caso sí con tendencia significativa de 0.014% de pérdida al año para toda la zona, pérdida directamente relacionada con la evolución decreciente de DíasNS (Tabla 3.3).

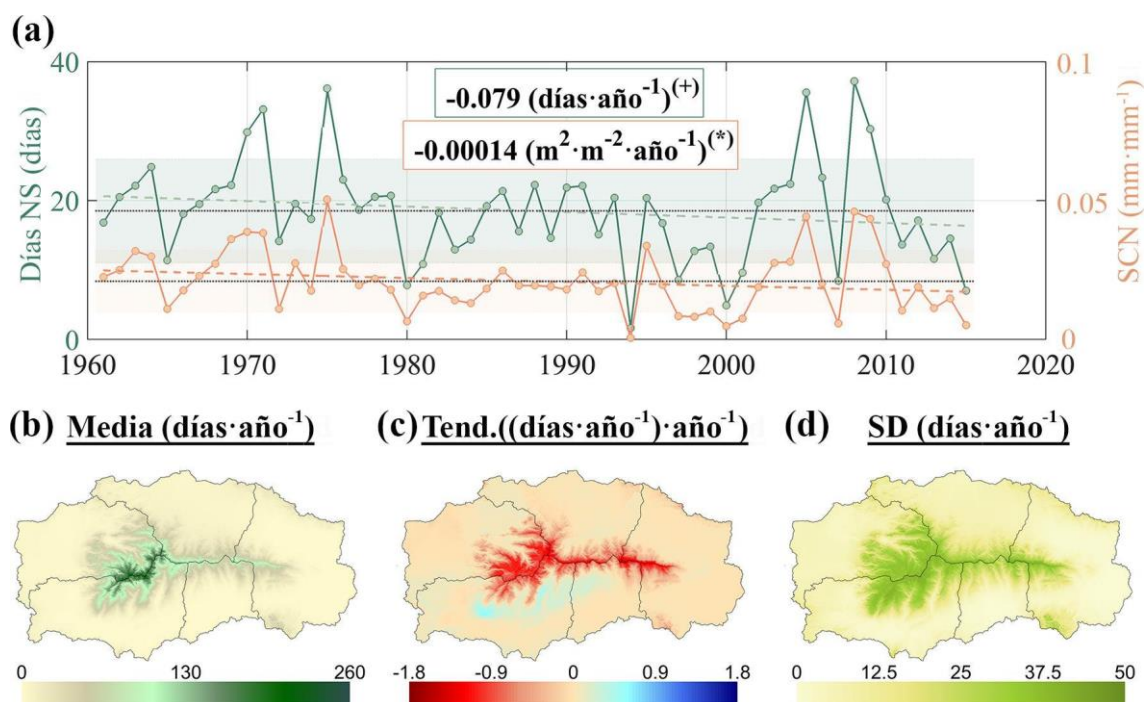


Figura 3.8 (a) Evolución del número de días con nieve en superficie (verde) y Superficie Cubierta de Nieve media (salmón) anual en el periodo 1961-2015 promediada en el área de estudio: línea discontinua: tendencia de la evolución; línea continua: valor medio del periodo de estudio; área sombreada: desviación típica de la variable. (b) mapa distribuido del valor medio de días con nieve en superficie (c) tendencias distribuidas en el área de estudio para la variable de días con nieve en superficie (d) mapa de la desviación típica distribuida para la variable de días con nieve en superficie 1961-2015.

Los valores medios para los 55 años a escala distribuida se muestran en la Figura 3.8b. Estos valores fluctúan entre 260 días, para las zonas cumbres de la sierra, 100 días para las zonas cercanas a los 2000 m s.n.m. y 70 días para zonas comprendidas entre los 1500 y los 2000 m s.n.m. Esta variable pone de manifiesto como el área influenciada por la presencia de nieve se encuentra muy localizada en las cotas superiores, hecho que no debe olvidarse al analizar los valores promediados en toda la zona de estudio de las variables derivadas de la capa de nieve, los cuales tienen en cuenta toda el área de la región. Para el caso de las tendencias (Figura 3.8c) y la desviación típica (Figura 3.8d) distribuidas, y al igual que otras variables analizadas, se observa grandes cambios en las zonas ubicadas a cotas superiores a los 2000 m s.n.m.. Con tendencias decrecientes significativas destacan R4 (Genil) con -0.16 días al año de pérdida y R1 (Adra) con -0.05 días de pérdida al año. Se observa el R5 (Guadalfeo) un área a cotas bajas en la que la evolución de la variable es creciente, debido principalmente al cambio de distribución observado en la D5 (Figura 3.7).

Tabla 3.3 Estadísticos de las variables de persistencia en la capa de nieve analizadas para cada región (R1-R5) y para todo el área de estudio (Total), junto con las tendencias medias anuales obtenidas durante el periodo analizado 1961-2015. Los resultados del análisis de tendencias se definen según el test de Mann-Kendall como (1) significancia del $\alpha=0,01$ (**); (2) significancia del $\alpha=0,05$ (*); (3) significancia del $\alpha=0,1$ (*); o (4) sin significancia, $\alpha>0,1$ (+).

Días NS (días)					
	Máxima	Media	Mínima	Desviación	Tendencia
ADRA (R1)	35,9	13,6	0,6	7,2	-0,05 (*)
ANDARAX (R2)	24,4	8,1	0,5	5,2	-0,06 (+)
FARDES (R3)	36,2	16,4	1,1	7,81	-0,08 (+)
GENIL (R4)	51,7	28,3	3,3	10,3	-0,16 (**)
GUADALFEO (R5)	49,3	24,6	2,2	9,2	-0,03(+)
TOTAL	37,2	18,4	1,6	7,5	-0,08(+)
SCN medio(m²m⁻²)					

	Máxima	Media	Mínima	Desviación	Tendencia
ADRA (R1)	0,04	0,012	0,00	0,009	-2,44·e-5(+)
ANDARAX (R2)	0,03	0,006	0,00	0,005	-3,47·e-5(*)
FARDES (R3)	0,04	0,013	0,00	0,008	-6,34·e-5(+)
GENIL (R4)	0,08	0,036	0,00	0,017	-3,65 ·e-4(***)
GUADALFEO (R5)	0,07	0,032	0,00	0,016	-1,67·e-4(*)
TOTAL	0,05	0,021	0,00	0,011	-1,42·e-4 (*)

Evolución a escala mensual

A escala mensual (Figura 3.9), la evolución y distribución para ambas variables a esta escala es similar. Su análisis permite corroborar los meses con influencia de la nieve, siendo ésta más importante para los meses centrales del invierno, enero y febrero, con un valor máximo de 15 días al mes con nieve en superficie y con un área máxima cubierta por nieve de 907 km². El patrón decreciente para ambas variables es significativo en los meses de diciembre, abril, y junio, meses localizados al comienzo y final en el ciclo anual de la nieve, no siéndolo en la parte central del ciclo. Es interesante observar cómo, sin embargo, los meses de noviembre y mayo no experimenta este cambio significativo a pesar de ser meses con poca presencia de nieve y estar localizados en los extremos del ciclo anual.

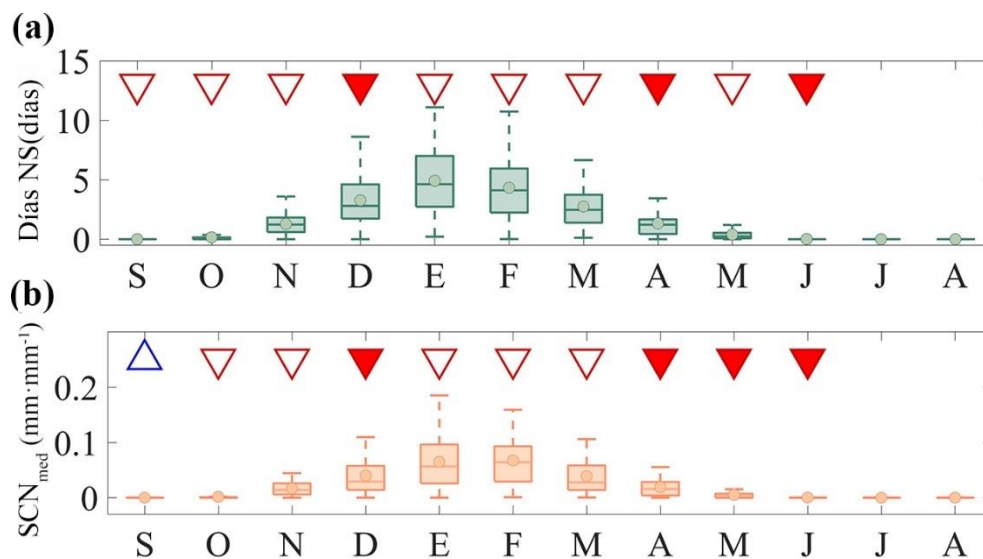


Figura 3.9 Diagrama de cajas sobre la evolución de la dinámica de la nieve: a) Días con nieve en superficie al mes; b) Superficie Cubierta de nieve media mensual. Triángulo azul: evolución creciente, triángulo rojo: evolución decreciente. En ambos casos, la intensidad del color refleja las estaciones con tendencia estadísticamente significativa con un nivel de confianza superior al 90%.

3.4 Discusión

El análisis realizado en este capítulo proporciona una estimación de la evolución de los procesos relacionados con la dinámica de la nieve en los últimos 55 años. Al igual que en Jimenez *et al.* (2014), se han encontrado relaciones directas entre la evolución obtenida para la precipitación en forma de nieve (Capítulo 1) y las variables aquí analizadas relacionadas con la persistencia de la nieve. Los procesos analizados mostraron una alta variabilidad en las tres escalas temporales analizadas. Sin embargo, la escala mensual aportó diferencias en la evolución que confirman su variabilidad interanual (Grundstein and Leathers, 1999; Mot *et al.*, 2018). Al igual que se han analizado en otros estudios, el aumento de las temperaturas a escala mensual parece traducirse en una reducción de la SCN (Barnett *et al.*, 2005; Mote, 2006; Brown and Mote, 2009) y un inicio adelantado del deshielo (Takala *et al.*, 2009; Lopez-Moreno *et al.*, 2005 y 2013; Musselman *et al.*, 2015).

Los valores promediados por regiones para cada una de las variables analizadas en este capítulo así como sus tendencias se representan en la Figura 3.10. Es palpable la existencia de un gradiente este-oeste en todas las variables de nieve estudiadas, con valores mucho mayores, en términos medios en las regiones R4(Genil) y R5(Guadalefe), regiones definidas como no áridas para el régimen de precipitación en forma de nieve en el Capítulo 2, que presentan los mayores valores de los flujos de agua y de sus tendencias, si bien estas no siempre significativas y con signo opuesto (decreciente para la fusión y creción para la evaposublimación). En general este gradiente se observa también en las tendencias, con valores mayores para las regiones oeste, el cual implica además para la mayoría de las variables analizadas un cambio de signo en la tendencia. Evoluciones similares han sido reportadas en La Sierra Nevada (California) donde tendencias decrecientes más desfavorables en la dinámica de la nieve han sido encontradas para la parte oeste de la sierra, más influenciada por la presencia del mar (Howat y Slawek, 2005).

En el caso de las regiones áridas en su régimen de precipitación en forma de nieve R1, R2 y R3 (Adra, Andarax y Fardes) los valores medios difieren dependiendo de la variable, pero siempre muestran a la R2 (Andarax) como aquella con una menor presencia de nieve. Sus tendencias pueden cambiar de signo entre regiones y variables, pero siempre con valores muy cercanos a cero, a excepción de los DNS, en los que la pérdida es mayor. Esta pérdida en la persistencia coincide con la encontrada en los Andes (Chile), donde una pérdida del 15% de SCN es obtenida para el periodo 1979-2014 (Mernild *et al.*, 2016). Para el caso de Sierra Nevada, estas tendencias no son tan desfavorables (pérdida del 8% sobre el valor medio de SCN), sin embargo, este estudio abarca un periodo más amplio (1961-2015) con valores crecientes para las dos primeras décadas analizadas. Comparando las regiones no áridas en su régimen de precipitación en forma de nieve R4 y R5 (Genil y Guadalefe), se observa cómo a pesar de arrojar valores similares en cuanto a las medias, siendo R4 más representativa en cuanto a persistencia de nieve y R5 en términos de volumen, sus tendencias para todas las variables son diferentes.

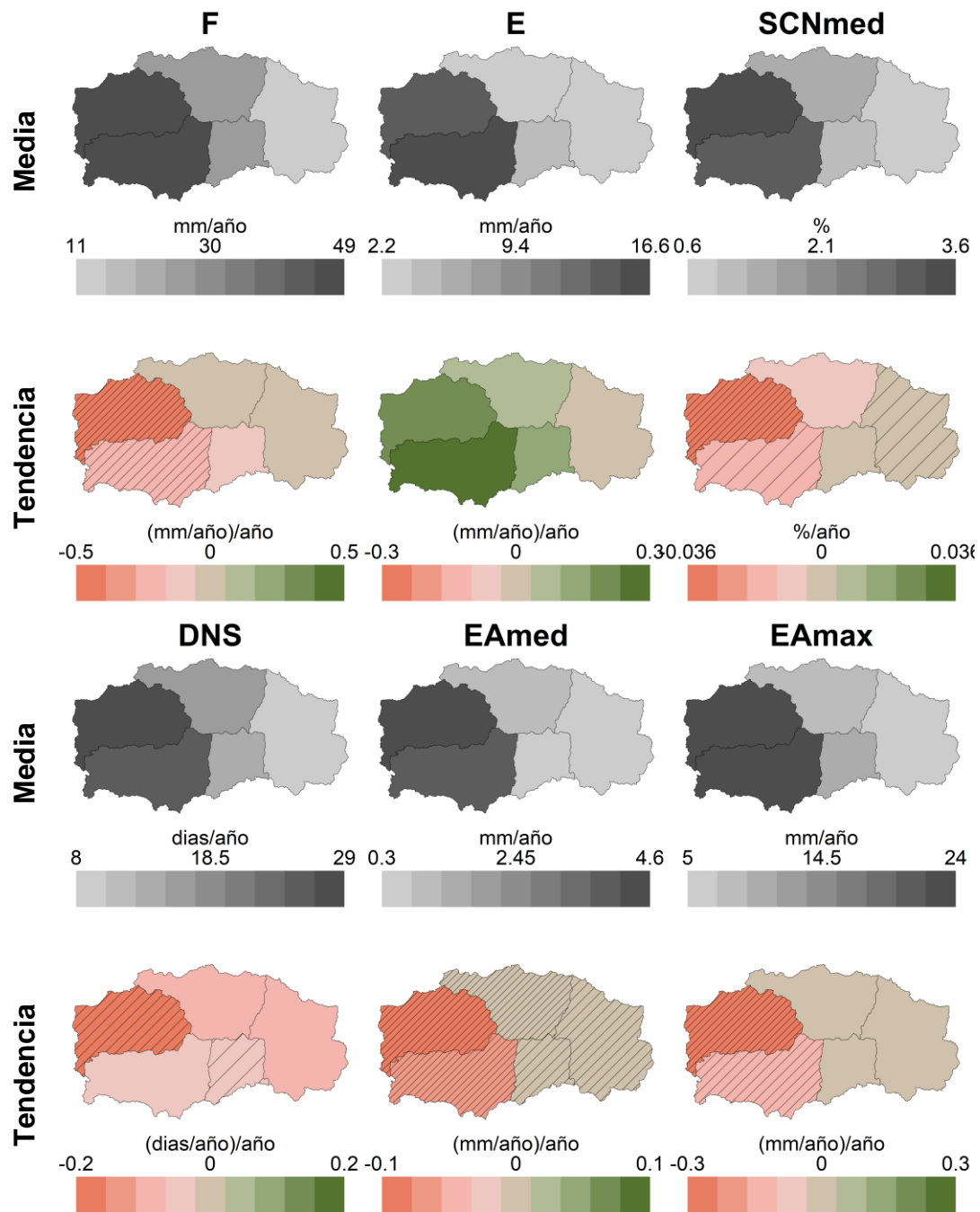


Figura 3.10 Distribución regional en Sierra Nevada de los valores medios en las variables analizadas junto con los valores de las décadas medias durante el periodo analizado 1961-2015.

Esta relación entre flujos de masa y aridez es representada en la Figura 3.11; donde, al igual que en capítulos previos, se representan el valor adimensionalizado del índice de aridez IAn (IAn*) y el valor adimensionalizado del valor relativo de los flujos de masa (F** y E**). La adimensionalización para ambas variables ha sido realizada con el valor medio de cada variable. El eje de abscisas está representado de manera invertida para localizar regiones más áridas y con mayores tasas del flujo de masa analizado en el primer cuadrante, debido a la definición del IAn, en la que valores menores implican una mayor aridez.

Del análisis por regiones se observa cómo las variaciones en la importancia relativa del término de fusión son muy cercanas al valor medio observado en el periodo para todas las regiones;

siendo en las regiones áridas (R1, R3 y R3) siempre positiva y en las regiones no-áridas negativa. Por el contrario, las variaciones del término relativo de evaposublimación, presentan una mayor dispersión con respecto a la media además de un carácter contrario al observado para la fusión. Es decir, la importancia del término de evaposublimación es mayor en las regiones no-áridas además de poseer una mayor variabilidad. Esto se aprecia en la disposición de las regiones en el diagrama, con una distribución cuasi-lineal de las mismas según un gradiente oeste-este que pasa por el origen para la relación F^{**} - IAn^{*} , que no se aprecia en la distribución de regiones para la relación E^{**} - IAn^{*} , en la que las regiones con importancia relativa de este término sí parecen responder a dicho comportamiento pero las regiones en el intervalo árido se dispersan.

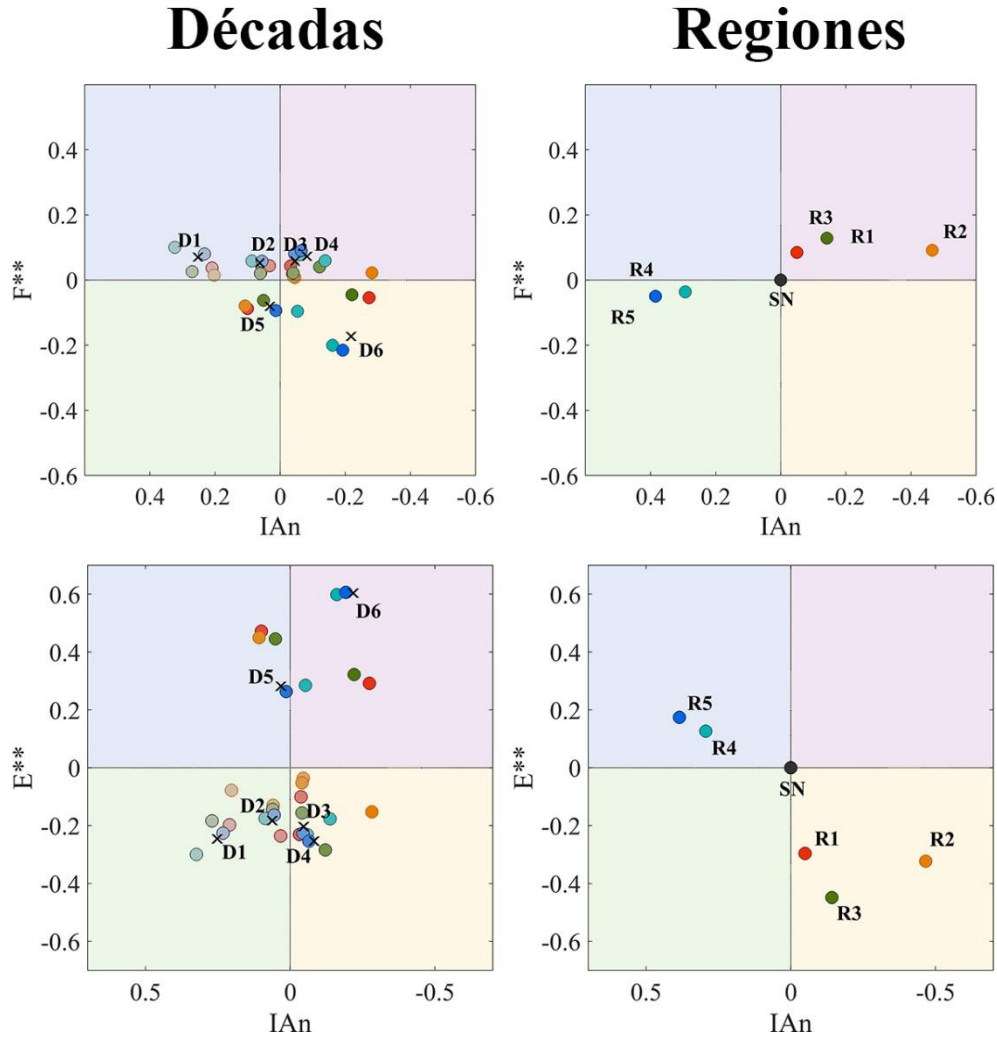


Figura 3.11 Condiciones de aridez (IAn^{*}) vs importancia relativa adimensionalizada de los flujos de masa en la capa de nieve F^{**} (fila superior) y E^{**} (fila inferior) por regiones para todo el periodo (columna derecha) y por décadas para cada región y para toda el área (aspas negras) (columna izquierda).

En el análisis a escala de década queda reflejado el carácter diferenciado de las dos últimas décadas, quedando los años de estas décadas representados fuera de la nube de puntos de los años de las cuatro primeras décadas. Este carácter aislado es mucho más importante para la evaposublimación, cuya importancia relativa frente a la fusión ha aumentado considerablemente en las últimas décadas. Para las D1 a D4 las pérdidas obtenidas por evaposublimación corresponden aproximadamente a un 20%. Siendo estos valores igualmente observados tanto en

zonas mediterráneas (Kattelmann and Elder, 1991; Mark and Dozier, 1992) como a en áreas a mayores latitudes norte (Hood *et al.*, 1999; Reba *et al.*, 2012). Sin embargo, dichas pérdidas aumentan considerablemente para la D5 y D6 (aproximadamente un 30%), valores que no han sido reportados en ningún otra área. A priori el carácter más o menos árido de la década no parece determinar la importancia relativa de los flujos, con valores de IAn menores de la media (IAn<0) para D5 y mayores (IAn>0) para D6.

Se representan en las Figuras 3.12 y 3.13 las mismas variables adimensionales F^{**} y E^{**} pero en este caso enfrentadas a las variables $DíasNS^{*}$ y DPn^{*} , versiones adimensionalizadas de las variables $DíasNS$ y DPn , que al igual que antes han adimensionalizadas con su valor medio en el periodo.

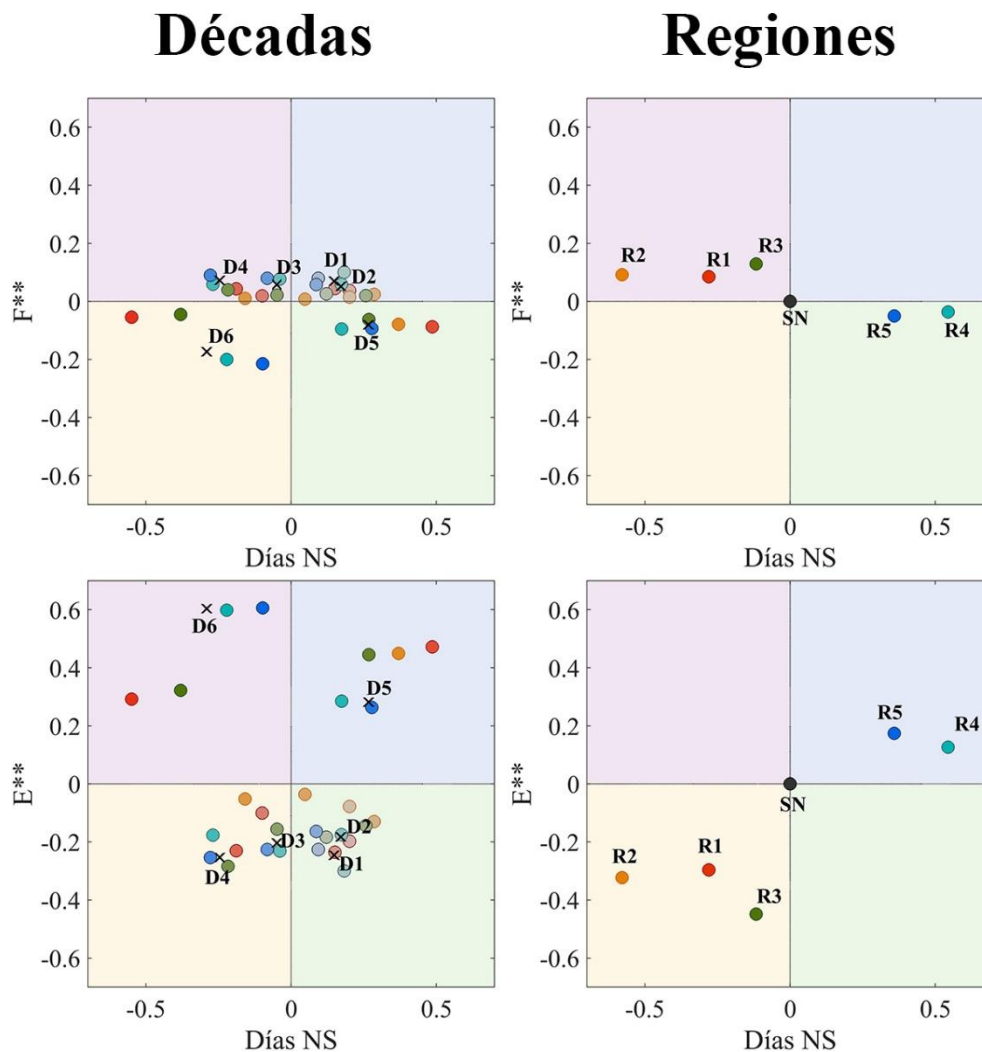


Figura 3.12 $DíasNS^{*}$ vs importancia relativa adimensionalizada de los flujos de masa en la capa de nieve F^{**} (fila superior) y E^{**} (fila inferior) por regiones para todo el periodo (columna derecha) y por décadas para cada región y para toda el área (aspas negras) (columna izquierda).

En el análisis por regiones para $DíasNS^{**}$, se observa cómo el reparto del flujo de evaposublimación está más condicionado que el de fusión al número de días con nieve en superficie, y que es mucho menor que la media en las regiones áridas en términos de precipitación en forma de nieve (R1, R2, R3). Es decir, para zonas en las que la capa de nieve perdura durante más tiempo, como es el caso de las regiones R4 y R5, el término de

evaposublimación gana importancia. Esto es coherente con las conclusiones de Herrero y Polo (2016) a partir de medidas experimentales de ambos flujos a lo largo de diferentes campañas en la zona de estudio; los resultados mostraban la continuidad del proceso de evaposublimación mientras que el flujo de fusión se produce solo cuando las condiciones termodinámicas y el resultado del balance de energía lo propician. En el análisis por décadas queda de manifiesto la diferencia entre las 4 primeras décadas y las dos últimas, en las que destaca la importancia relativa del término de evaposublimación, confirmando así la importancia de los flujos de evaposublimación en entornos semiáridos (Mac Donald *et al.*, 2010; Herrero y Polo, 2016; Lopez-Moreno *et al.*, 2017; Harpold and Brooks, 2018). Ambas décadas poseen un carácter diferenciado en cuanto al valor de $DíasNS^*$, si no se tienen en cuenta los valores de la D6, ya que no está completa; sin embargo tampoco parece existir una relación directa entre número de días con nieve en superficie y importancia de los flujos. En el caso de los días con precipitación en forma de nieve, todos los valores poseen valores muy cercanos a la media, siendo complicado encontrar relaciones entre esta variable y la importancia relativa de los flujos.

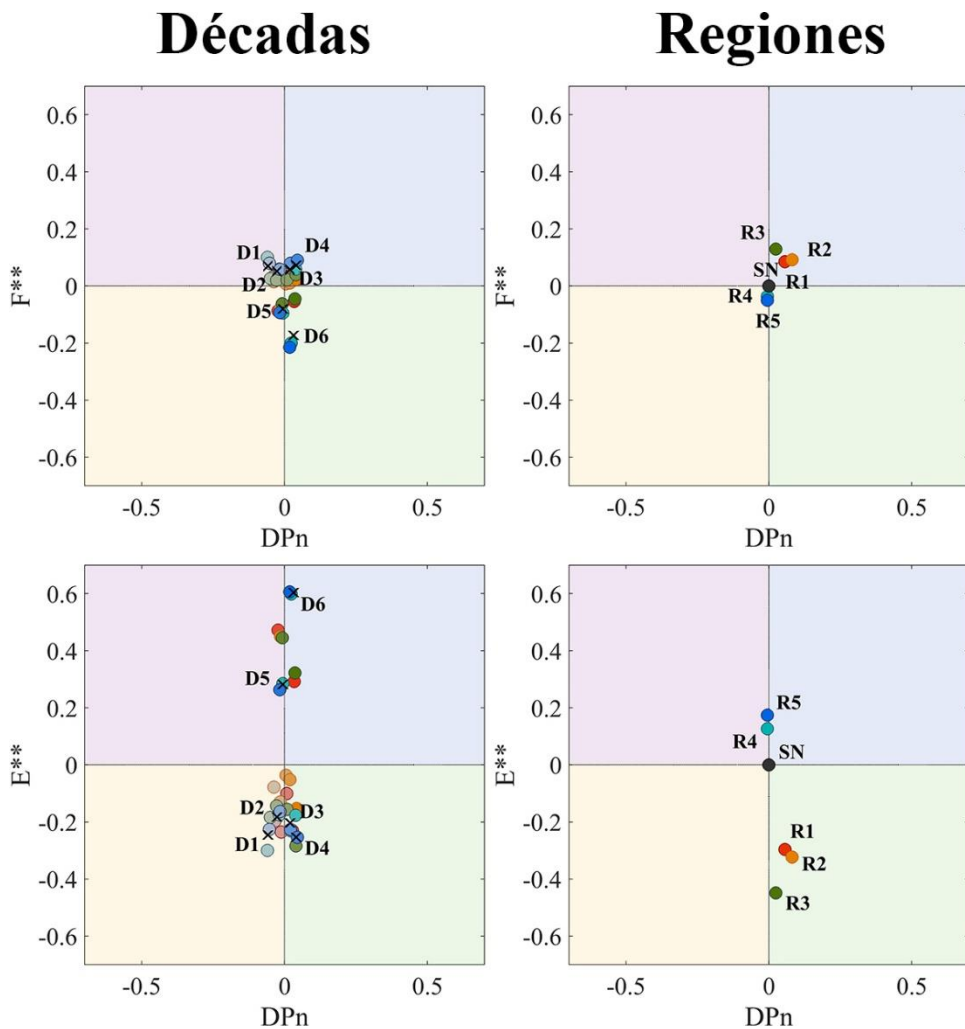


Figura 3.13 DPn^* vs importancia relativa adimensionalizada de los flujos de masa en la capa de nieve F^{**} (fila superior) y E^{**} (fila inferior) por regiones para todo el periodo (columna derecha) y por décadas para cada región y para toda el área (aspas negras) (columna izquierda).

3.5 Conclusiones

Se ha realizado un análisis de la dinámica de la capa de nieve a diversas escalas temporales y espaciales en la zona de estudio, a partir de la evaluación del régimen anual y decenal de los flujos de fusión y evaposublimación desde la capa de nieve para el periodo de estudio, así como de las principales variables descriptoras de la persistencia de la nieve. Los resultados muestran asimismo las tendencias a ambas escalas temporales de todas las variables analizadas y la comparación entre las regiones delimitadas en la zona de estudio.

A escala global, se observa una tendencia significativa decreciente para el flujo anual de fusión ($-0,204$ (mm/año)/año)), no así para el de evaposublimación, que experimenta un aumento desde mitad de la década de los noventa del siglo pasado, mostrando un papel más relevante frente a la ablación total en las dos últimas décadas (27% en D5 y 33% en D6), que se aprecia asimismo escala anual en la fracción que supone (E^*) a escala global de la zona de estudio, además de una mayor importancia en zonas con mayor presencia de nieve. La disminución de fusión no está directamente relacionada con el aumento de evaposublimación, sino que se ve influido por la tendencia de precipitación en general y de nieve en particular. La fusión media anual a escala de década no recupera los niveles de las décadas iniciales ni siquiera en las zonas de cumbres. Esto apunta a una disminución de los recursos hídricos superficiales aportados desde la nieve. A escala global, la evaposublimación supone un volumen medio anual de alrededor de 40 hm³ de agua durante el periodo de estudio en Sierra Nevada, un 21.5% de la ablación media total anual, frente a 146 hm³ asociados a la fusión. A escala estacional, los meses de primavera e inicio de verano muestran una tendencia decreciente significativa de ambos flujos de agua; la fusión mensual disminuye asimismo durante el final del otoño y el invierno, y aumenta durante el otoño, aunque sin tendencia estadística en ninguno de los casos. Sin embargo, la evaposublimación mensual aumenta durante el otoño y el invierno, arrojando tendencia estadística únicamente en el mes de enero; esto concuerda con resultados del Bloque I que mostraban una pérdida de precipitación durante ese mes.

La dinámica del balance de energía y agua genera tendencias decrecientes significativas en el equivalente de agua medio anual global en la zona de estudio, así como para su valor máximo, confirmando el menor almacenamiento de agua en la capa de nieve, si bien con una mayor variabilidad desde mitad de los años 90 del siglo pasado. A escala estacional todos los meses presentan esta disminución que es tendencia estadística durante todo el invierno y primavera.

En términos de variables asociadas al régimen de la nieve en superficie, se identifican R5 (Guadafeco) y R4 (Genil) como aquellas con mayor presencia de nieve, siendo R4 (Genil) más representativa en cuanto a términos de persistencia (SCN y DiasNS) y la R5 (Guadafeco) en cuanto a flujos de agua y volumen almacenado se refieren. Sin embargo, R4 (Genil) es la que experimenta unas mayores tasas de cambio, observándose tendencias mucho más acentuadas de pérdida de flujos de masa y persistencia de los procesos nivéos. La tendencia no es siempre significativa en cuanto a la caracterización de la persistencia, sin un patrón regional claro a excepción de la región Genil (R4). Esta pérdida de persistencia se manifiesta a escala estacional de forma más significativa en diciembre y primavera, tanto como superficie cubierta de nieve como en días con presencia de nieve en superficie.

CAPÍTULO 4: Evaluación de escenarios climáticos futuros en la dinámica de la nieve en Sierra Nevada

4.1 Introducción

Las tendencias climáticas, especialmente las precipitaciones a corto y largo plazo y las variaciones de temperatura, condicionan el régimen de nieve y la evolución hidrológica de la respuesta del caudal del río a escala de cuenca y subcuenca. Especialmente importante es la relación existente entre las tendencias climáticas y el caudal en las zonas de alta montaña, donde las pequeñas variaciones de temperatura, entre otros factores, pueden producir impactos significativos en la precipitación (con ocurrencia en forma de nieve o lluvia), deshielo y procesos de sublimación/evaporación, condicionado la magnitud y escalas de los flujos asociados (Mote, 2003; Berhuijs *et al.*, 2014; Hamlet *et al.*, 2015).

En los últimos años, se viene observando cambios en los patrones de precipitación a escala global (Groisman *et al.*, 2005; Kevin, 2011; Chou *et al.*, 2012; Solomon *et al.*, 2017). Además, el análisis de los eventos de precipitación muestra un incremento en su variabilidad espaciotemporal en las últimas décadas (Klein *et al.*, 2002; New *et al.*, 2001; Norrant *et al.*, 2006). Estas variaciones, junto con el aumento de la temperatura, están afectando tanto a la cantidad como a la distribución de la precipitación en forma de nieve, especialmente en regiones las semiáridas (Pérez-Palazón *et al.*, 2015), debido a sus condiciones particularmente extremas (Benington 2003; IPCC, 2014) y con una alta variabilidad del régimen climático anual y estacional. Este es el caso de las zonas Mediterráneas de alta montaña, donde condiciones alpinas y semiáridas coexisten en una misma zona (Giorgi, 2006).

El objetivo de este capítulo es evaluar el impacto de escenarios futuros de emisiones en la dinámica de nieve en el área de estudio durante el siglo XXI (2006-2100). Para ello, se evaluarán primero los regímenes de precipitación, temperatura y precipitación en forma de nieve (Capítulo 1); en segundo lugar, su torrencialidad y aridez, utilizando alguno de los índices previamente definidos (Capítulo 2); y finalmente el impacto directo en las variables asociadas a la dinámica de la nieve definidas (Capítulo 3). Este análisis se realizará a aquellas escalas espaciotemporales que han resultado ser más significativas para cada variable en los capítulos previos de esta tesis.

4.2 Metodología

4.2.1 Selección de datos de escenarios futuros

Las series de datos de precipitación y temperatura proporcionadas por la la Agencia Estatal de Meteorología Española (AEMET) en las estaciones localizadas en el área de estudio (ver sección *Red de monitorización y datos meteorológicos disponibles*) para ambos periodos, referencia y futuro, han sido utilizadas. Los datos seleccionados corresponden a dos de los escenarios de emisión definidos en el AR5-IPCC (IPCC, 2014): RCP4.5, escenario con un nivel medio de emisiones y RCP8.5 escenario con un nivel alto de emisiones. De entre las 18 posibles combinaciones entre los 9 modelos globales de circulación disponibles (GCM4, MPI-ESM-LR, ECHO, GFDL, GISS-AOM, GISS-ER, INM-CM4, MIR-GCM2-0, y MIR-GCM2-1) y las 2 técnicas de *downscaling* (SDMS y análogos) facilitadas por la AEMET (ver sección

Información climática: proyecciones de clima futuro bajo escenarios de emisiones), el modelo "Max Planck Institute Earth System" para baja resolución (MPI-ESM-LR; Block *et al.*, 2013), usando para el *downscaling* el método análogos (Zorita *et al.*, 2013) fue la combinación seleccionada.

Aunque suele ser recomendado el uso de la media de todo el conjunto de modelos de circulación globales, *ensemble*, en los estudios de impacto, algunos autores han señalado que no hay razón para esperar que este *ensemble* proporcione siempre la mejor estimación de las señales del cambio climático (Boé y Terray, 2015). Aunque es algo obvio que un conjunto de modelos debe proporcionar más información que uno solo, no está necesariamente claro cómo utilizar esa información de manera óptima en la práctica (Knutti *et al.*, 2010). Diferentes autores (Giorgi *et al.*, 2002; Tebaldi *et al.*, 2005) han propuesto el uso de métricas para seleccionar entre modelos climáticos la realización de estudios de impacto cuando el uso del *ensemble* no es probable que mejore las evaluaciones climáticas futuras. En este contexto, estas métricas se refieren al uso de indicadores cuantitativos de desempeño del modelo durante simulaciones climáticas pasadas o presentes en relación a las observaciones disponibles, bajo el supuesto de que se espera que esta métrica también sea informativa sobre la probabilidad de que el modelo simule correctamente la variable objetivo bajo un escenario climático futuro.

Por tanto, previo al análisis de impacto, se llevó a cabo una primera evaluación de las proyecciones modeladas teniendo en cuenta la extensión y la escarpada topografía del área de estudio y la resolución espacial de los modelos climáticos. Tras este análisis, se definieron dos métricas de las series de datos históricos a escala local: (1) la media anual de la temperatura mínima diaria y (2) la precipitación anual. Cada combinación de modelo de circulación global y técnica de *downscaling* fue evaluada para las estaciones con información disponible dentro del área durante el período de referencia, calculándose a su vez un error asociado, el error medio cuadrático (RMSE) fue la función objetivo escogida. En todos los casos, el método de análogos dio como resultado valores de RMSE más bajos para la temperatura. Sin embargo, en sólo dos casos del conjunto de modelos analizados, los valores de la temperatura mínima daban valores inferiores a un 1°C, siendo uno de ellos muy próximo a este valor, lo cual supone una limitación a la hora de estimar el régimen de precipitación en forma de nieve. Con respecto a la precipitación, los valores de RMSE obtenidos fueron similares para ambas técnicas de *downscaling*, estadísticos y de análogos. Sin embargo, la variabilidad entre modelos alcanzaba en muchos casos valores de error superiores al 50%. El modelo seleccionado, MPI-ESM-LR, fue el que arrojó valores menores de este error, con RMSE = 0,8°C y RMSE = 201 mm para temperatura mínima y precipitación respectivamente. Por este motivo, esta combinación fue seleccionada para el presente estudio.

El modelo global seleccionado, MPI-ESM-LR, es una combinación entre el modelo atmosférico ECHAM6 (Stevens *et al.*, 2013) el MPI OceanModel (MPI-OM; Jungclaus *et al.*, 2013) para los océanos (Kalnay *et al.*, 1996; Maier-Reimer *et al.*, 2005; Jones *et al.*, 2013; Kaminski *et al.*, 2013) a baja resolución. El método de *downscaling* analógico seleccionado se basa en el uso de análogos sinópticos para cada día de la serie temporal (Petisco *et al.*, 2005; Petisco y Marín, 2006).

4.2.2 Análisis de variables descriptoras en el periodo futuro

Partiendo de las series de datos de precipitación y temperatura para la combinación seleccionada de modelo de circulación global y técnica de *downscaling* (MPI-ESM-LR - Análogos)

disponibles en las estaciones del área de estudio, se sigue la misma estructura metodológica utilizada en los capítulos previos: (1) interpolación de variables meteorológicas, (2) determinación de ocurrencia de precipitación en forma de nieve, (3) cálculo de índices de torrencialidad y aridez y (4) análisis de variables asociadas a la dinámica de la nieve. La interpolación espacial se realiza con el módulo de interpolación, MeteoMap (Aguilar *et al.*, 2014) integrado dentro del modelo hidrológico WiMMed, utilizando algoritmos testados en la zona y específicos para cada una de las variables (ver sección *Interpolación de variables meteorológicas*). La determinación de la ocurrencia de precipitación en forma de nieve se realiza a escala diaria a partir del método TSN (ver sección *Análisis de la precipitación en forma de nieve*). Los índices de torrencialidad y aridez son definidos en base a los regímenes meteorológicos. Finalmente, para las variables utilizadas para el estudio de la dinámica de la nieve son calculadas con el módulo de nieve del modelo hidrológico WiMMed (ver sección *Modelado de la dinámica de la nieve*).

Tabla 4.1 Tabla resumen de los índices definidos, en las distintas escalas espaciotemporales para el periodo futuro comprendido entre 2006-2100. A - evolución de la variable analizada a escala anual; D - evolución la distribución por décadas de la variable analizada a escala anual; V - valor anual medio de la variable analizada

		Global			Regiones			30 x 30		
		A	D	V	A	D	V	A	D	V
Meteo	Pre									
	Tmed									
	Tmax									
	Tmin									
	Pn									
	DPn									
ITyA	IAp									
	ITp									
	IAn									
	ITn									
Nieve	E									
	F									
	EAméd									
	EAmáx									
	DNS									
	SCN									

Siguiendo esta metodología, 15 son las variables analizadas (todas previamente definidas en las secciones metodológicas de los Capítulos 1, 2 y 3 de esta tesis), las cuales pueden agruparse en tres categorías: variables meteorológicas (Pre, Tmed, Tmax, Tmin, DPn), índices de torrencialidad y aridez (IAp, ITp, IAn, ITn), y variables descriptoras de la dinámica de la nieve (F, E, EA_{med}, EA_{máx}, DNS, SCN). Para cada una de ellas diferentes análisis serán realizados a aquellas escalas espaciotemporales que han resultado ser más significativas en los capítulos previos de esta tesis. A escala espacial, tres son las opciones: global, regional o completamente distribuida (30m x 30m). A escala temporal tres son las posibilidades: evolución de la variable analizada a escala anual (A), evolución la distribución por décadas de la variable analizada a escala anual (D), valor anual medio de la variable analizada (V). La Tabla 4.1 muestra cuáles de

las posibles combinaciones han sido realizadas para cada variable. El análisis regional tanto para índices de aridez como para variables descriptoras de la dinámica de la nieve ha sido llevado a cabo sólo en las regiones R2 (Andarax) y R5 (Guadalfeo) por tratarse de las regiones con regímenes de precipitación en forma de nieve más y menos árido, respectivamente.

Finalmente, la evolución temporal y los estadísticos principales son calculados para cada una de las variables descritas para cada una de las escalas espaciotemporales. Al igual que en los capítulos anteriores la detección de tendencias estadísticas se realiza mediante el test de Mann-Kendall (Gibbons y Chakraborti, 2010).

4.3 Resultados

Los resultados serán mostrados como anomalías absolutas para todas las variables analizadas con excepción de los índices de torrencialidad y aridez, que al tratarse de índices se ha preferido mostrar su valor en términos absolutos. Estas anomalías son calculadas como la diferencia entre los valores de la variable obtenidos en el periodo futuro (2006-2100) y el valor medio de la variable para el periodo de referencia (1960-2000) utilizando en ambos casos los datos obtenidos con la técnica de *downscaling* análogos para el modelo de circulación global MPI-ESM-LR. La Tabla 4.2 muestra los valores de las variables analizadas en el periodo de referencia para el modelo de circulación y técnica de *downscaling* seleccionadas.

Tabla 4.2 Tabla resumen de los valores medios para el periodo de referencia para cada una de las regiones de la zona de estudio de las variables seleccionadas.

Régimen meteorológico						
	P(mm)	Tmax (°C)	Tmed (°C)	Tmin(°C)	Pn(mm)	
ADRA (R1)	336,9	16,9	11,8	0,6	65,3	
ANDARAX (R2)	317,8	17,7	12,1	1,1	44,8	
FARDES (R3)	349,6	17,9	17,8	0,4	60,0	
GENIL (R4)	308,4	17,8	12,2	0,6	74,8	
GUADALFEO (R5)	334,6	17,1	11,7	0,1	76,1	
TOTAL	327,6	17,5	11,8	0,6	63,2	
Flujos en la capa de nieve						
	E(mm/año)	F(mm/año)	EA _{med} (mm)	EA _{max} (mm)	DíasNS	SCN(m²m⁻²)
ANDARAX (R2)	16,1	19,2	0,27	4,1	13,7	0,027
GUADALFEO (R5)	1,3	6,6	0,03	1,3	3,8	0,003

4.3.1 Análisis de regímenes meteorológicos

La Figura 4.1 representa la evolución media anual de la temperatura diaria media, máxima y mínima en el área de Sierra Nevada para las proyecciones futuras en el periodo 2006-2100, expresada como anomalías absolutas obtenidas de los valores medios durante el periodo de referencia (1960-2000). A escala anual, se observa un incremento de todas las temperaturas para ambos escenarios analizados. Como era de esperar, las tendencias y anomalías del RCP8.5 son más severas que las encontradas en el RCP4.5. La anomalía de la temperatura media sigue una variabilidad suave durante el periodo futuro para ambos escenarios, siendo positiva en todos los casos analizados. Las anomalías para las temperaturas mínimas y máximas muestran un régimen bastante variable, con valores negativos en ambos escenarios. Este hecho se observa también a escala de década.

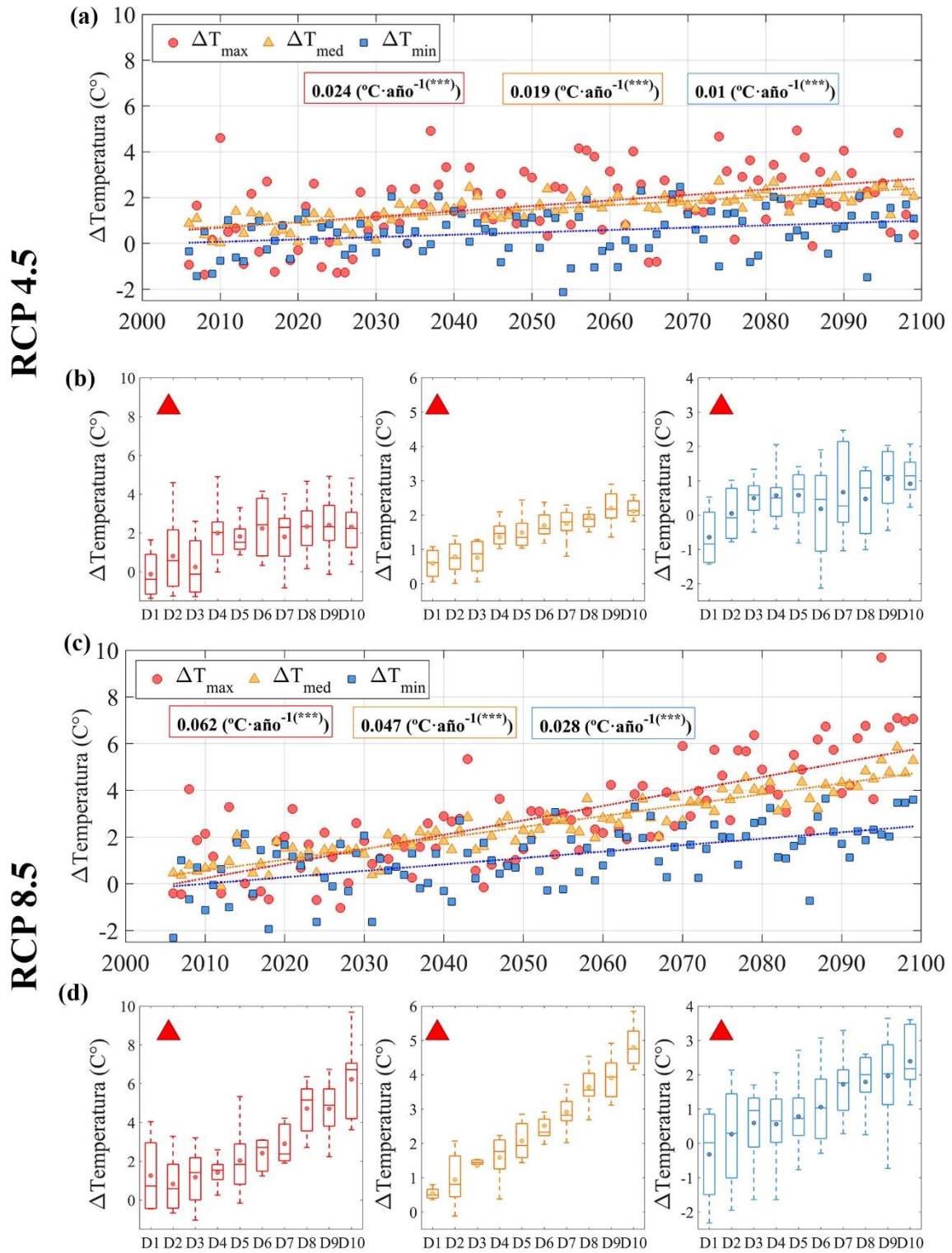


Figura 4.1 Evolución de la anomalía media anual (a,c) de la temperatura media, máxima y mínima diaria; y a escala decenal de la máxima, media y mínima (b,d) para los dos escenarios de cambio climático analizados, respectivamente para el periodo 2006-2100. Test de significancia estadística es aplicado al análisis de tendencias anual siendo: (1) significancia del $\alpha = 0,01$ (**); (2) significancia del $\alpha = 0,05$ (*); (3) significancia del $\alpha = 0,1$ (+); o (4) sin significancia, $\alpha > 0,1$ (+).

En todos los casos analizados las tendencias resultantes tienen una significancia estadística con un nivel de confianza del 99%. Anomalías negativas fueron encontradas a escala anual y decenal en los valores de temperatura diaria máxima y mínima para la proyección del escenario RCP4.5. Los resultados se propagan a través de todo el periodo de estudio con aparente estabilidad a escala decenal para ambas temperaturas en la última parte del periodo. Esto no se

observa en el escenario RCP8.5, con anomalías cercanas a los 6° en ambas variables, tanto a escala anual y decenal en las últimas décadas del periodo de estudio. Las anomalías anuales y de décadas de temperatura mínima media diaria muestran la mayor variabilidad para todos los casos analizados. Para el escenario RCP8.5, esta variable sigue una tendencia creciente en la que prevalecen los valores positivos durante las últimas décadas del periodo de estudio.

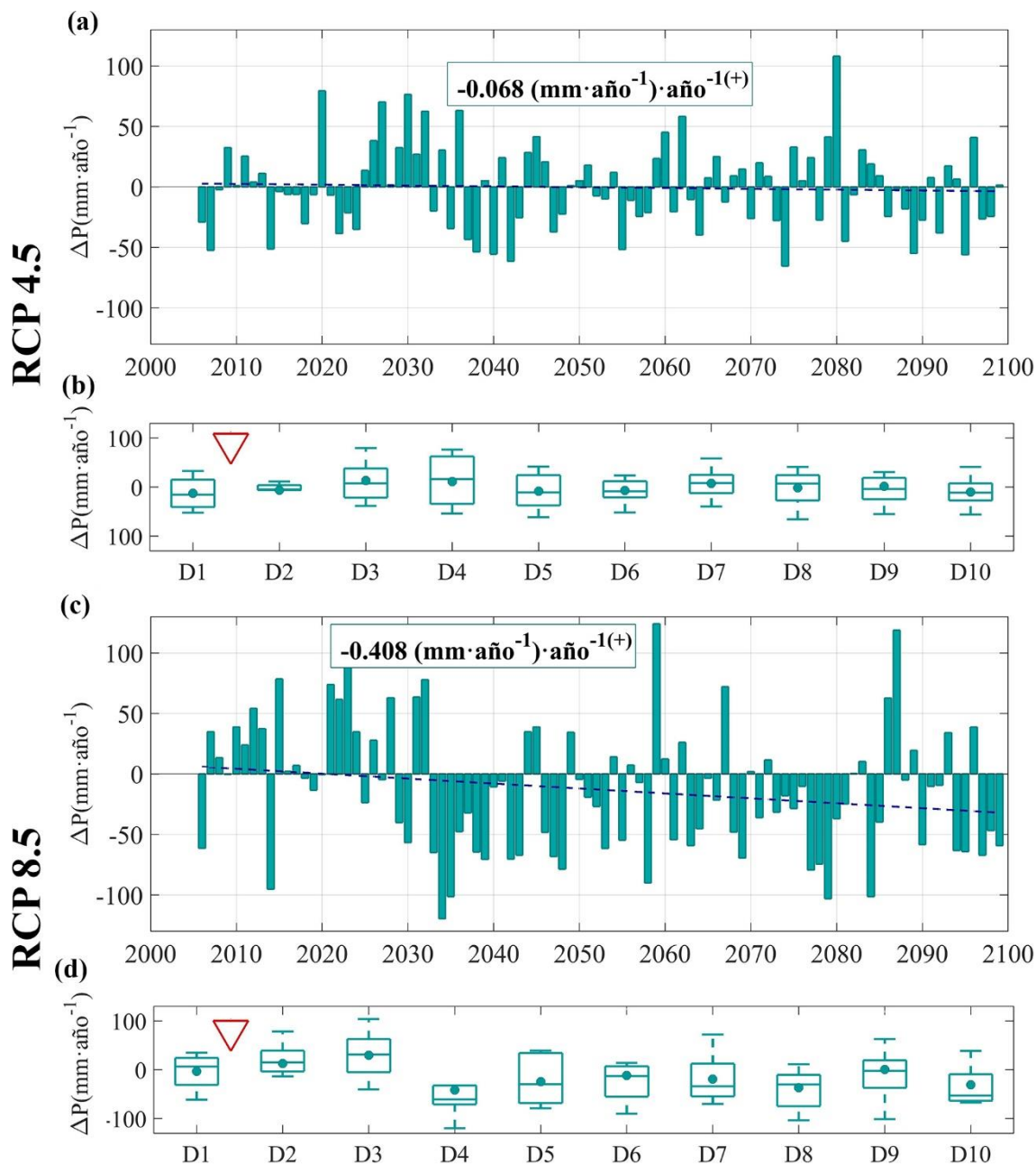


Figura 4.2 Evolución de la anomalía media anual (a,c) de la precipitación anual; y a escala decenal de la máxima, media y mínima (b,d) para los dos escenarios de cambio climático analizados, respectivamente para el periodo 2006-2100. Test de significancia estadística es aplicado al análisis de tendencias anual siendo: (1) significancia del $\alpha = 0,01$ (**); (2) significancia del $\alpha = 0,05$ (*); (3) significancia del $\alpha = 0,1$ (*); o (4) sin significancia, $\alpha > 0,1$ (+).

La Figura 4.2 muestra la evolución anual y de por décadas de la precipitación anual en el área de Sierra Nevada para proyecciones futuras durante el periodo de estudio comprendido entre el año 2006 al 2100, expresada como anomalías absolutas a partir del valor medio durante el periodo de referencia. A diferencia de las tendencias de temperatura, se observa una evolución decreciente para ambos escenarios. Sin embargo, la tendencia encontrada en el RCP8.5 es

estadísticamente significativa, siendo además cuatro veces superior a la tendencia negativa no significativa encontrada para el RCP4.5. Se debe tener en cuenta que la media anual en precipitación en el periodo difiere un 4% entre ambos escenarios, siendo 503 y 482 mm/año para el escenario RCP4.5 y RCP8.5 respectivamente. Sin embargo, se encuentra una gran diferencia en la desviación estándar asociada (44.11 y 47.33 mm/año para RCP4.5 y 8.5, respectivamente).

Las tendencias a escala de década no son estadísticamente significativas. De hecho, las primeras tres décadas del RCP8.5 y las primeras cuatro en el caso del RCP4.5, reflejan una evolución creciente en las precipitaciones. Las anomalías por décadas son más heterogéneas para el caso del escenario RCP8.5.

Estos resultados tienen un claro impacto en la distribución de la ocurrencia de precipitación en forma de nieve, como se describe en la siguiente sección. Esto es particularmente relevante en las cotas más altas, como muestra la Figura 4.3, donde puede observarse un aumento en los valores medios en la temperatura y una la disminución de las precipitaciones para todo el período de estudio.

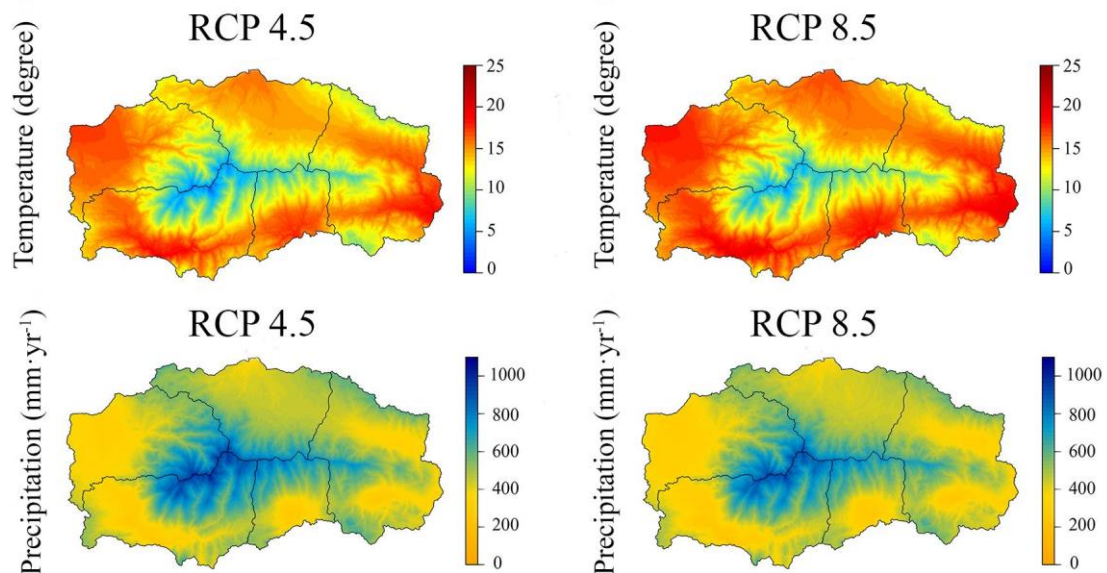


Figura 4.3 Distribución espacial de la temperatura media diaria anual y la precipitación anual para los dos escenarios futuros analizados para el periodo 2006-2010 en el área de estudio.

Basándose en los resultados anteriores, se estimó la ocurrencia diaria de precipitación en forma de nieve para cada escenario de manera distribuida a una resolución espacial de 30m × 30m (Tabla 4.3). La Figura 4.4 muestra la distribución espacial de las anomalías de la precipitación en forma de nieve media anual en el área de estudio durante el periodo futuro bajo los escenarios climáticos analizados en este trabajo, junto con las tendencias medias anuales durante el periodo de estudio. Los valores más severos se encuentran en las zonas de cotas altas (es decir, en la mayoría de las anomalías negativas), siendo mayores y más extendidos en superficie para el RCP8.5, tal y como se esperaba. Sólo bajo el RCP4.5 algunas áreas de la parte Oeste de las cuencas de Sierra Nevada mostraron anomalías positivas, aunque éstas fueron mucho más bajas en valores absolutos que las negativas. Las tendencias son negativas en todos los casos, y son más severas en el área del dominio de la nieve.

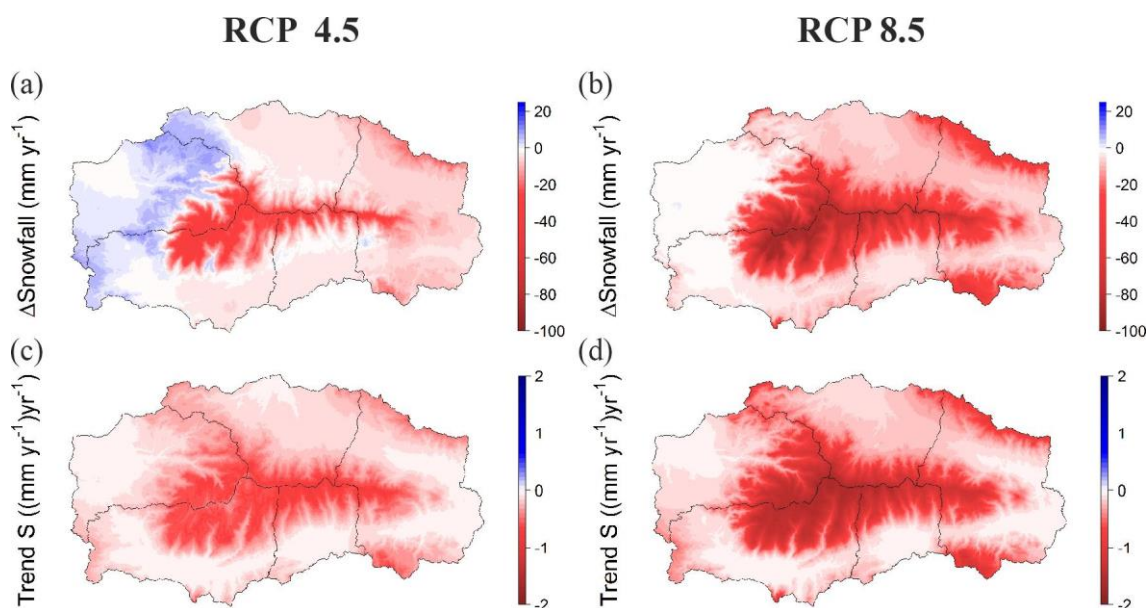


Figura 4.4 Distribución espacial de las anomalías medias anuales (a, b) y tendencias anuales (c, d) para los dos escenarios analizados durante el periodo 2006-2100 en el área de estudio.

La Tabla 4.3 muestra los valores medios durante el periodo de estudio futuro de las variables objeto de análisis de este estudio promediados en cada región de Sierra Nevada y en toda el área de estudio (SN) para ambos escenarios, junto con los resultados del análisis de tendencias realizado para todo el periodo de estudio.

Tabla 4.3 Tabla resumen de los valores medios de las variables meteorológicas estudiadas durante el periodo 2006-2100 bajo cada uno de los escenarios analizados (RCP4.5 y RCP8.5) en las regiones en las que se divide la zona de estudio (R1-R5) y todo el área analizada (Total) junto con las tendencias anuales asociadas. Los resultados del análisis de tendencias se definen según el test de Mann-Kendall como (1) significancia del $\alpha=0,01$ (***); (2) significancia del $\alpha=0,05$ (**); (3) significancia del $\alpha=0,1$ (*); o (4) sin significancia, $\alpha>0,1$ (+).

RCP4.5						
	P (mm)		Tmed (°C)		Pn (mm)	
	Media	Tendencia	Media	Tendencia	Media	Tendencia
ADRA (R1)	574,3	-0,109(+)	13,4	0,0191(***)	57,0	-0,289(***)
ANDARAX (R2)	379,5	-0,060(+)	13,5	0,0190(***)	26,7	-0,215(***)
FARDES (R3)	446,9	-0,068(+)	12,9	0,0193(***)	61,6	-0,236(***)
GENIL (R4)	556,6	-0,119(+)	13,4	0,0193(***)	105,0	-0,232(***)
GUADALFEO (R5)	653,2	-0,070(+)	14,1	0,0195(***)	117,5	-0,271(***)
TOTAL	513,1	-0,081(+)	13,2	0,0192(***)	73,3	-0,243(***)
RCP8.5						
	P (mm)		Tmed (°C)		Pn (mm)	
	Media	Tendencia	Media	Tendencia	Media	Tendencia
ADRA (R1)	549,3	-0,408(**)	14,3	0,0471(***)	41,0	-0,408(***)
ANDARAX (R2)	364,5	-0,290(**)	14,6	0,0460(***)	15,7	-0,362(***)
FARDES (R3)	428,9	-0,286(*)	14,3	0,0469(***)	48,6	-0,416(***)
GENIL (R4)	535,6	-0,370(+)	14,8	0,0472(***)	91,0	-0,442(***)
GUADALFEO (R5)	626,2	-0,436(*)	14,2	0,0474(***)	99,5	-0,553(***)
TOTAL	492,1	-0,352(**)	14,4	0,0470(***)	60,3	-0,448(***)

Los valores medios obtenidos para la precipitación en forma de nieve para el periodo analizado muestran una gran diferencia en función de los dos escenarios estudiados. Estos valores medios

oscilan entre 117,5 mm, para la R5 (Guadalfeo) en el escenario RCP4.5, y los 15,7 mm obtenidos para la R2 (Andarax) en el escenario RCP8.5. La Figura 4.5(a y c) muestra la evolución anual de las anomalías de la precipitación en forma de nieve al año promediadas para cada región de Sierra Nevada (Figura ii) y en toda el área de estudio durante el periodo futuro 2006-2100 en ambos escenarios en estudio. Valores decrecientes de tendencias fueron encontrados en todos los casos, siendo el escenario RCP8.5 tal y como se esperaba el que produce un mayor impacto, para los regímenes de nevadas anuales y de décadas. Las tendencias para las diferentes regiones de Sierra Nevada muestran valores similares para en un escenario dado, siendo sin embargo más pronunciadas en el R5 (Guadalfeo), región más influenciada por la presencia de nieve. Sin embargo, la escala anual revela la alta variabilidad que esta variable presenta para el período futuro en todas las regiones bajo ambos escenarios.

La evolución a escala de década para la precipitación en forma de nieve acumulada anual para el periodo futuro bajo cada escenario puede observarse en la Figura 4.5(b y d) obtenido mediante anomalías promediadas para cada región de Sierra Nevada y toda el área de estudio. El régimen de década muestra de manera más eficiente la disminución de la precipitación en forma de nieve asociada a ambos escenarios en todas las regiones, siendo el escenario RCP8.5 el que causa el mayor impacto en la ocurrencia de nevadas en todos los casos. La variabilidad anual es elevada en todas las décadas proyectadas, siendo las anomalías en R2 (Andarax) inferiores a las del resto de las regiones. Sin embargo, esta región es también la más árida en términos de la nieves de las analizadas, con una precipitación media anual de nieve de 36.6 mm/año durante el periodo de referencia 1961-2000. Las anomalías son positivas para la primera mitad del período futuro en el escenario RCP4.5 en la mayoría de las regiones; sin embargo, descienden a valores negativos después de tres décadas en el escenario RCP8.5.

La Figura 4.6 (a y c) muestra la evolución anual del índice de DPn durante el periodo 2006-2100 para cada región de Sierra Nevada y toda el área de estudio. Una vez más, se ilustra cómo R5, con los mayores valores de DPn (entre 44 y 8 días al año para el escenario RCP4.5, y entre 38 y 4 días al año para el escenario RCP8.5), es el dominio más influenciado por la nieve en Sierra Nevada, mientras que R2 muestra su marcado régimen semiárido. Las tendencias decrecientes se encuentran para ambos escenarios en todos los casos; sin embargo, se encuentran diferencias relevantes entre los escenarios.

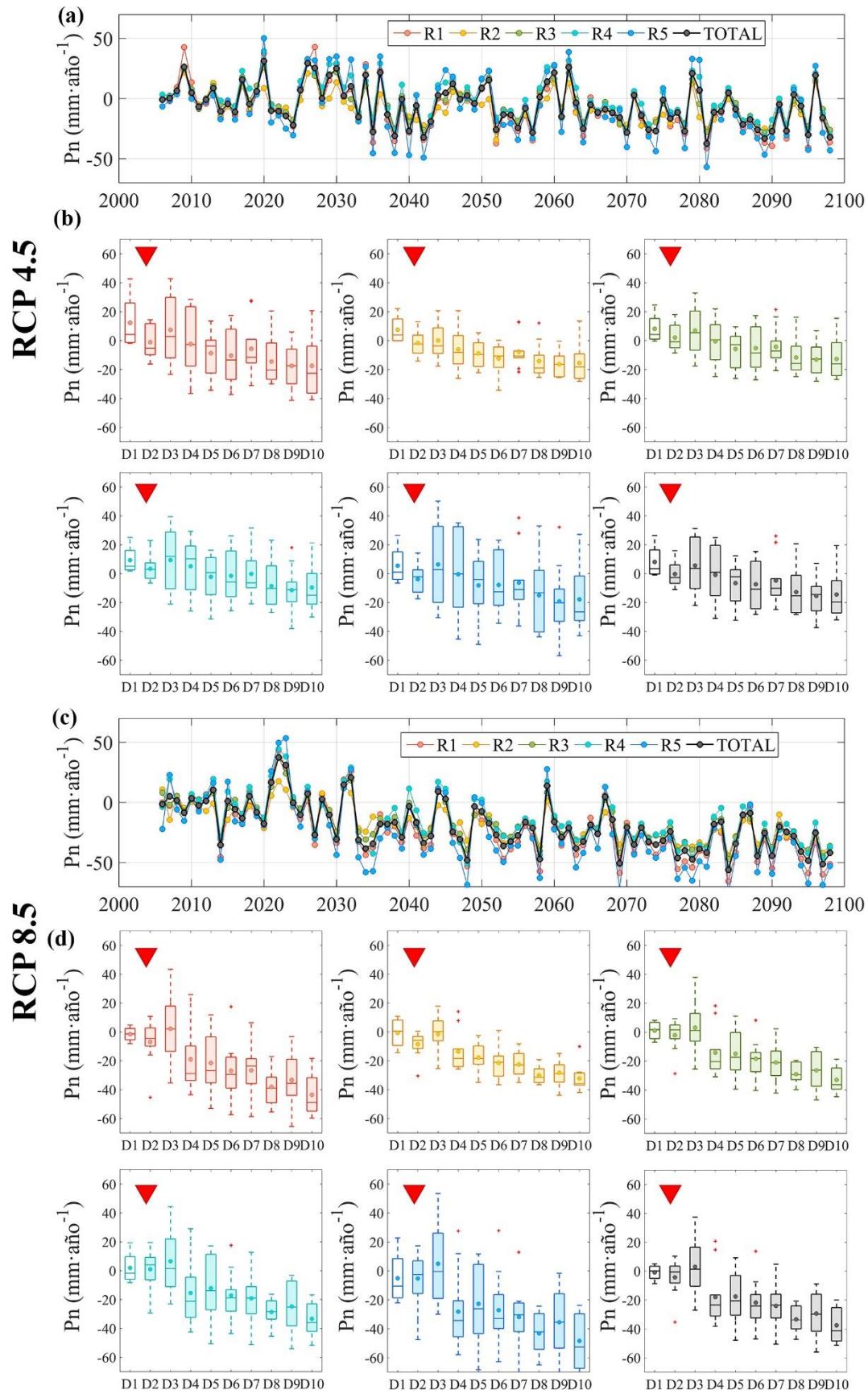


Figura 4.5 Evolución anual de las anomalías anuales de la precipitación en forma de nieve durante el periodo futuro de estudio 2000-2100 para (a) RCP4.5 y (b) RCP8.5, promediadas en cada región de Sierra Nevada y en toda el área de estudio; anomalías anuales de la precipitación en forma de nieve promediadas en cada región en comparación con las anomalías promediadas en toda el área de estudio en el caso de (c) RCP4.5, (d) RCP8.5.

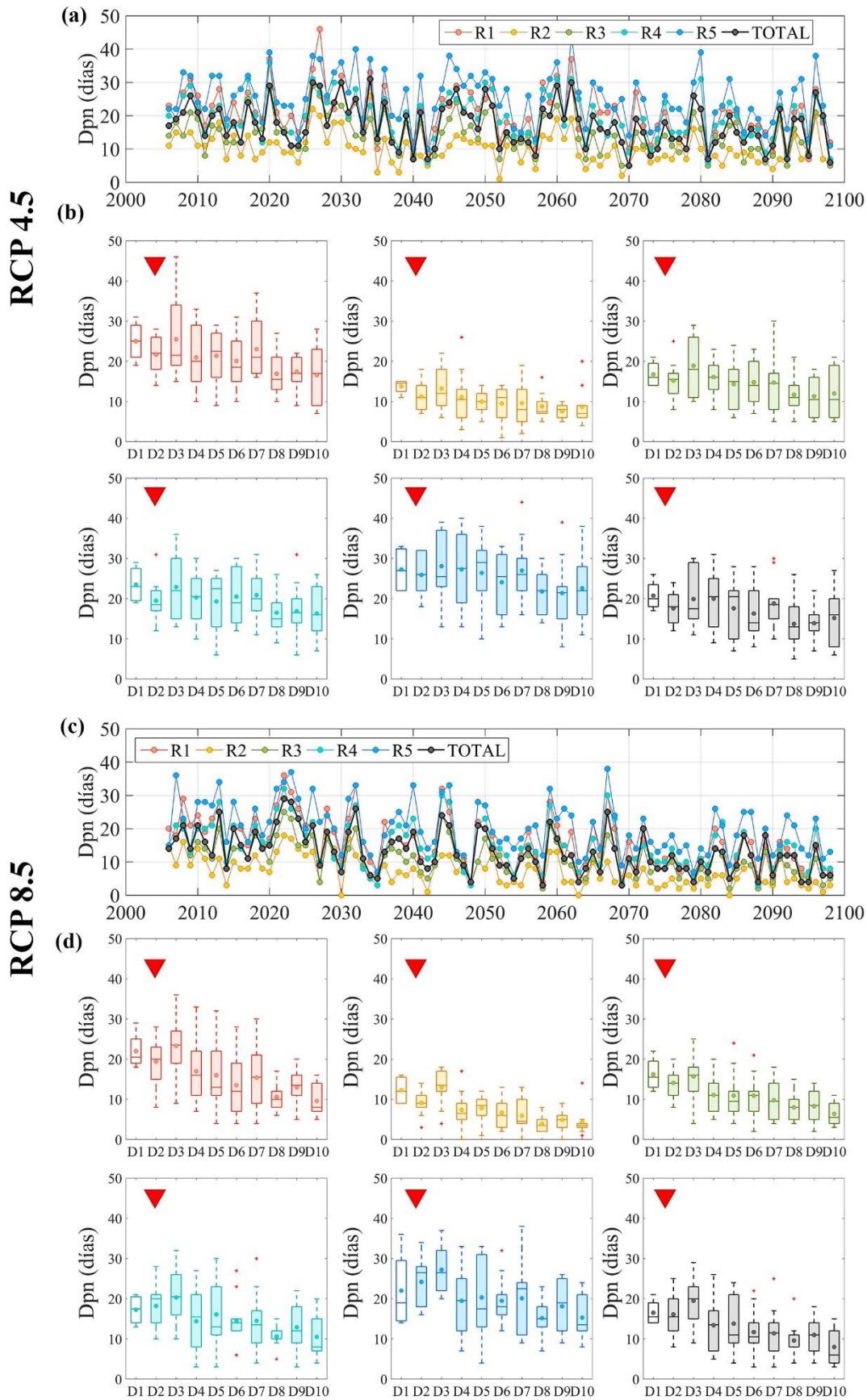


Figura 4.6 Evolución anual (a,c) y por décadas (b,d) de los días con precipitación en forma de nieve durante el periodo futuro de estudio 2006-2100 para (a) RCP4.5 y (b) RCP8.5, promediadas en cada región de Sierra Nevada y en todas las regiones del área de estudio.

4.3.2 Análisis de torrencialidad y aridez

4.3.2.1 Obtenidos con la precipitación

Índice de aridez (IAp)

Los valores del IAp para el periodo 2006-2100 se muestran en la Figura 4.7. El valor medio en el periodo no difiere mucho entre ambos escenarios, siendo 24.6 mm/°C para el RCP4.5 y 23.9 mm/°C en el caso del RCP8.5. Sin embargo, las tendencias observadas sí que poseen valores diferenciados, -0.043 (mm/°C)/año frente a -0.006 (mm/°C)/año. Aunque ambas son tendencias decrecientes, el escenario RCP8.5 predice una disminución un 50% a la observada en el RCP4.5 (Tabla 4.4). Las diferencias entre las dos regiones analizadas se encuentran en torno a 3(mm/°C)/año, valor mucho menor al encontrado para las mismas regiones en el periodo histórico, donde esta diferencia rondaba los 20 (mm/°C)/año. La diferencia se debe a una disminución del valor de este índice en la R5 (Guadalefe), la que para ambos escenarios futuros estaría adquiriendo condiciones más áridas.

Tabla 4.4 Valores estadísticos para el índice IAp en el periodo 2006-2100 para los escenarios de estudio en el área de Sierra Nevada: Tendencias medias anuales globales, valores medios, valores máximos y valores mínimos. Los resultados del análisis de tendencias se definen según el test de Mann-Kendall como (1) significancia del $\alpha=0,01$ (**); (2) significancia del $\alpha=0,05$ (*); (3) significancia del $\alpha=0,1$ (*); o (4) sin significancia, $\alpha>0,1$ (+).

IAp				
Escenario RCP4.5				
	Máxima	Media	Mínima	Tendencia
R2	32,4	23,0	17,3	-0,04 (***)
R5	41,8	26,9	17,7	-0,05 (**)
Total	35,2	24,6	17,5	-0,04 (***)
Escenario RCP8.5				
	Máxima	Media	Mínima	Tendencia
R2	28,5	21,8	14,9	-0,05 (***)
R5	39,2	24,7	14,4	-0,07 (***)
Total	33,4	22,9	14,9	-0,06 (***)

El análisis por décadas (Figura 4.7.b), muestra similitudes entre los valores medios obtenidos a lo largo de todo el periodo para el escenario RCP4.5. Por el contrario, para el escenario RCP8.5, un cambio brusco aparece tras las tres primeras décadas. En ambos escenarios se observa una mayor variabilidad en la R5 (Guadalefe).

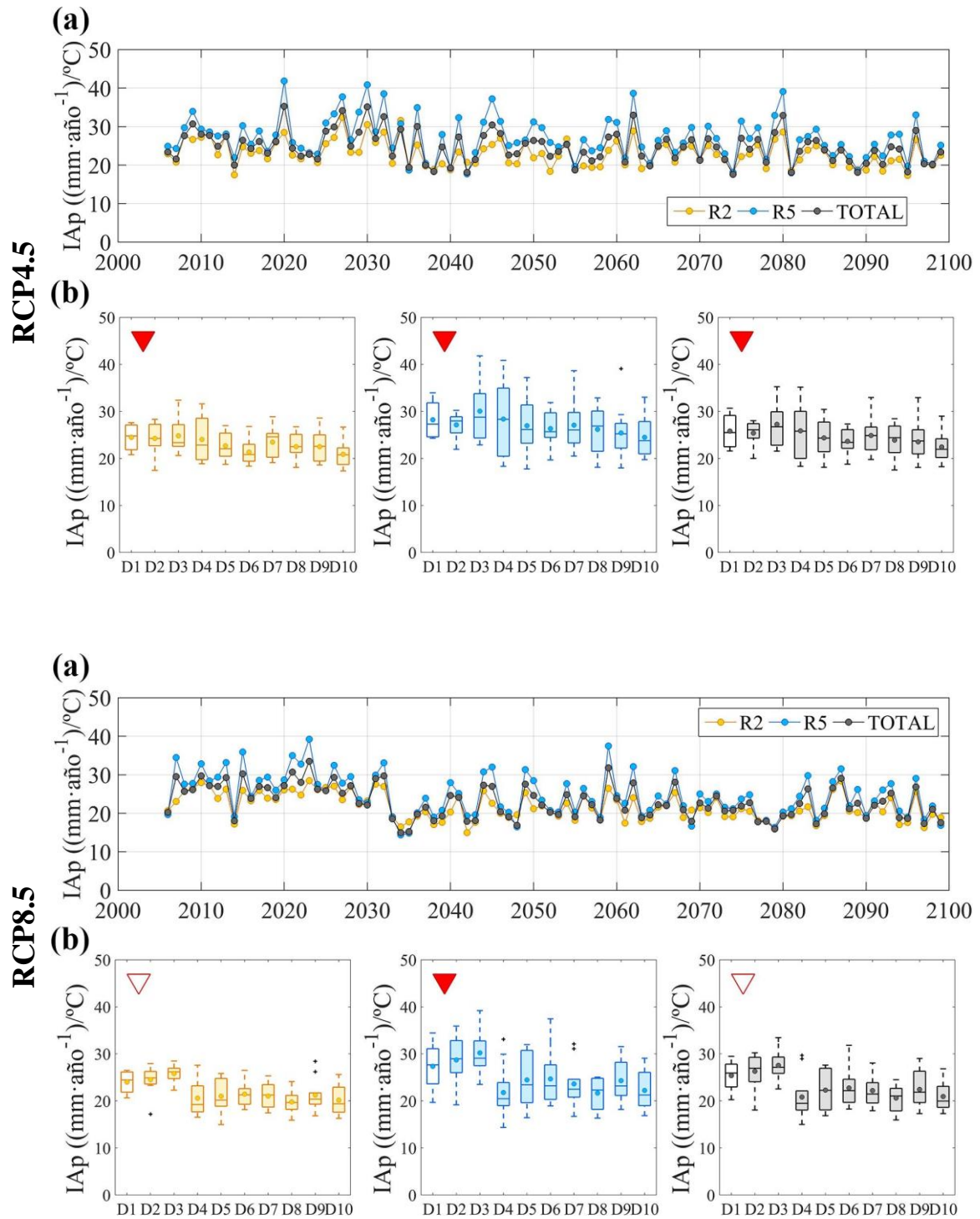


Figura 4.7 Evolución anual y por décadas del IAp para los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 en el área de SN para el periodo de estudio 2006-2100. Para ambas escalas temporales análisis por regiones (R1: rojo; R2: naranja; R3: verde oliva; R4: turquesa; R5: azul; Total: negro). Evolución obtenida en cada una de las regiones a escala de década: triángulo rojo: evolución decreciente; triángulo azul: evolución creciente. (Triángulo relleno, tendencia estadística con significancia $\alpha = 0.1$).

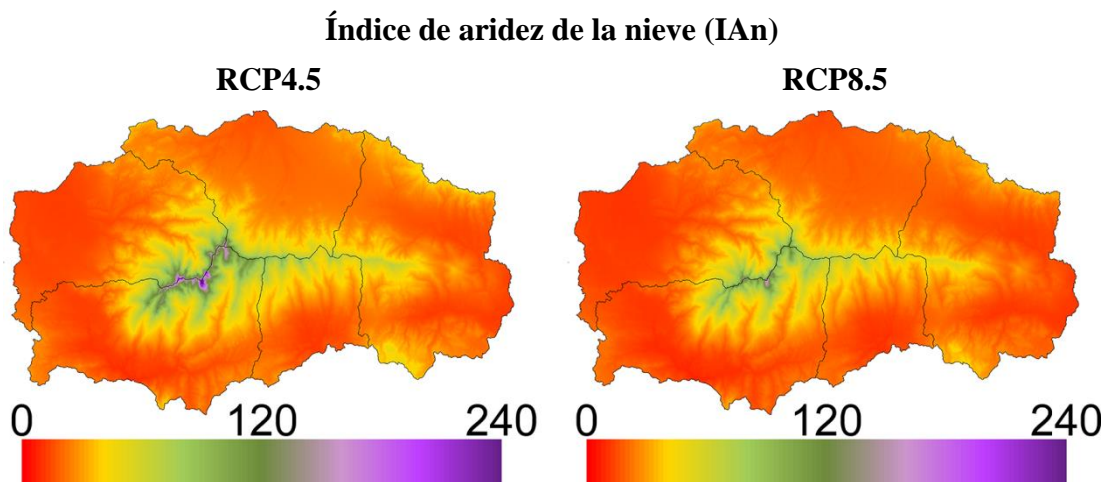


Figura 4.8 Distribución media anual de IAp para los escenarios seleccionados en el periodo de estudio 2006-2100

La Figura 4.8 muestra el valor distribuido medio del índice IAp. Como cabría esperar, el escenario RCP8.5, pronostica valores más severos para el índice representado, valores menores, siendo las zonas de cumbre aquellas en las que la diferencia entre escenarios es más visible. A pesar de poseer menor variabilidad entre escenarios, las zonas a cotas bajas de las regiones localizadas en las regiones más al oeste R4 (Genil) y R5 (Guadalfeo) destacan por su carácter árido, carácter no tan palpable en el periodo histórico.

Índice de torrencialidad (IT_P)

La Figura 4.9 presenta la evolución anual del Índice de Torrencialidad para los umbrales seleccionados (p99, p95, p90, p75, p50, p10) en el área de Sierra Nevada durante el periodo 2006-2100. En la Tabla 4.5 se representan los valores estadísticos y tendencias obtenidas para ambos escenarios. Aunque los valores medios y los extremos no difieren mucho de ambos escenarios, las tendencias sí que tienen caracteres diferentes. Por un lado, el escenario RCP4.5, muestra tendencias crecientes para todos los umbrales analizados. Esto concluye en un retraso en la ocurrencia de la precipitación a lo largo del año hidrológico. Por el contrario, el escenario RCP8.5, muestra tendencias positivas para los tres primeros umbrales, y negativas para el resto de estos, prediciendo un retraso en las primeras precipitaciones y un adelanto de las últimas, es decir, concentrándose de esta manera la acumulación de precipitación en menos tiempo y por tanto aumentando el carácter torrencial de la zona. Por tanto, como era predecible, la distribución temporal de la precipitación es más desfavorable para el caso del escenario RCP8.5, respecto al RCP4.5. Siendo su evolución, además, más severa.

Si se comparan estos resultados con los obtenidos para el periodo de referencia, se observa que ninguna de las evoluciones proyectadas tiene un carácter similar a la analizada en el 1961-2015. En la cual, existe un adelanto de las primeras precipitaciones y una mayor espacialidad temporal entre eventos.

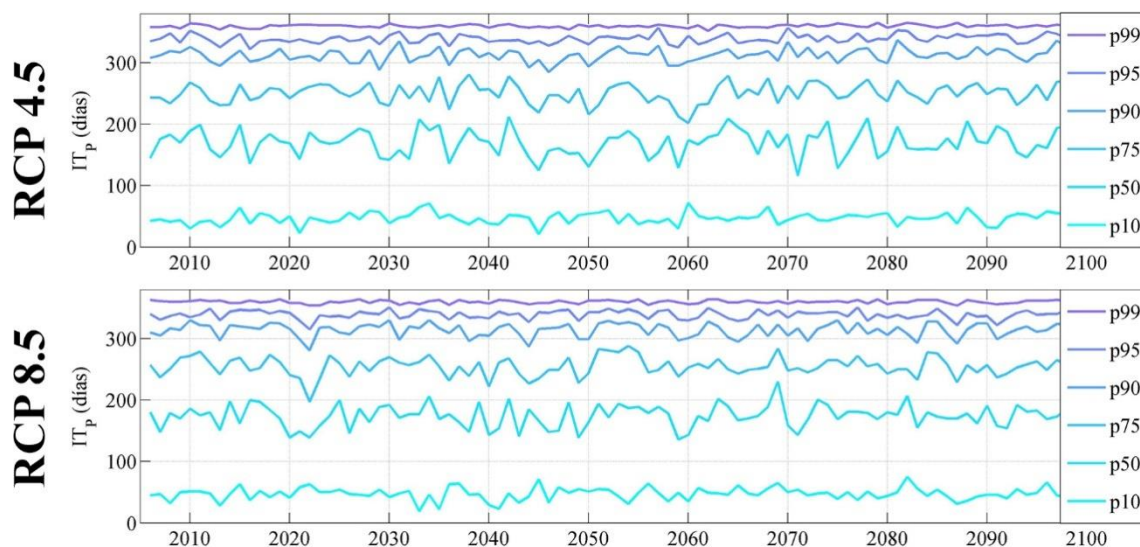


Figura 4.9 Evolución anual y por décadas del ITp para los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 en el área de Sierra Nevada para el periodo de estudio 2006-2100.

Tabla 4.5 Valores estadísticos en los umbrales seleccionados para el índice ITp en el periodo 2006-2100 para los escenarios de estudio en el área de Sierra Nevada: Tendencias medias anuales globales, valores medios, valores máximos y valores mínimos. Los resultados del análisis de tendencias se definen según el test de Mann-Kendall como (1) significancia del $\alpha=0,01$ (**); (2) significancia del $\alpha=0,05$ (*); (3) significancia del $\alpha=0,1$ (*); o (4) sin significancia, $\alpha>0,1$ (+).

ITp					
Escenario RCP 4.5					
Total		Máxima	Media	Mínima	Tendencia
	P10	72	47.23	21	0.058(*)
	P50	212	169.89	116	0.046(*)
	P75	281	250.65	202	0.077(*)
	P90	337	321.21	285	0.072(*)
	P95	357	339.16	322	0.055(*)
	P99	365	359.69	352	0.014(*)
Escenario RCP 8.5					
Total		Máxima	Media	Mínima	Tendencia
	P10	75	47.28	19	0.012(*)
	P50	230	174.55	136	0.088(*)
	P75	288	254.72	197	0.006(*)
	P90	330	314.16	281	-0.0027(**)
	P95	351	339.16	315	-0.007(*)
	P99	364	359.90	354	0.029(**)

4.3.2.2 Obtenidos con la precipitación en forma de nieve

Índice de aridez de la nieve (IAN)

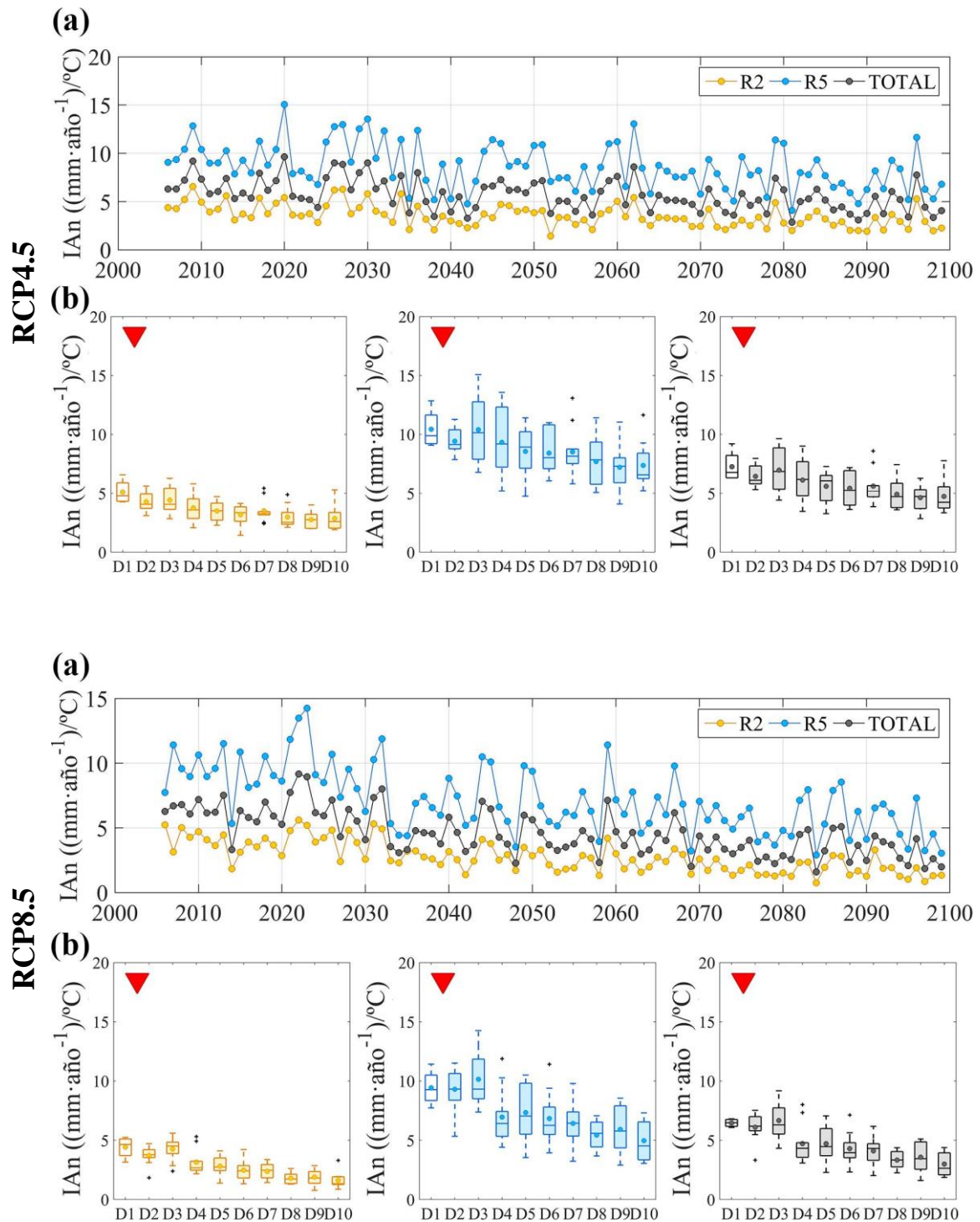


Figura 4.10 Evolución anual y por décadas del IAN para los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 en el área de Sierra Nevada para el periodo de estudio 2006-2100. Para ambas escalas temporales análisis por regiones (R2: naranja; R5: azul; Total: negro). Evolución obtenida en cada una de las regiones a escala de década: triángulo rojo: evolución decreciente; triángulo azul: evolución creciente. (Triángulo relleno, tendencia estadística con significancia $\alpha = 0.1$).

La Figura 4.10 muestra la evolución anual y decenal durante el periodo 2006-2100 del Índice de aridez de la nieve en los distintos escenarios analizados. Ambos escenarios, muestran una

variabilidad similar de este índice con valores medios anuales que oscilan entre 1.6 y 9.6 mm/°C para todo el área de estudio. Tendencias decrecientes significativas aparecen para ambos escenarios analizados (Tabla 4.6) con valores -0.03 (mm/°C)/año y -0.04 (mm/°C)/año para los escenarios futuros RCP4.5 y RCP8.5. Esto equivaldría a un decrecimiento total promedio de 2.63 mm/°C frente a los 4.51 mm/°C al año para los respectivos escenarios. Los valores por décadas, al igual que para el IAp (Figura 4.7), representan un decrecimiento paulatino del índice que se refleja en un aumento de la aridez de la nieve. Este decrecimiento, es más acentuado a partir de la D6 del escenario RCP8.5. Al contrario que para el régimen de precipitación, en el caso del régimen de precipitación en forma de nieve, las diferencias observadas en el pasado aunque en menor magnitud siguen manteniéndose. Sin embargo, llama la atención, la disminución que se observa en los valores máximos, donde las proyecciones medias sobre la zona muestran variaciones de aproximadamente el doble (Tabla 4.6).

Tabla 4.6 Valores estadísticos para el índice IAn en el periodo 2006-2100 para los escenarios de estudio en el área de Sierra Nevada: Tendencias medias anuales globales, valores medios, valores máximo y valores mínimos. Los resultados del análisis de tendencias se definen según el test de Mann-Kendall como (1) significancia del $\alpha=0,01$ (***); (2) significancia del $\alpha=0,05$ (**); (3) significancia del $\alpha=0,1$ (*); o (4) sin significancia, $\alpha>0,1$ (+).

IAn				
Escenario RCP4.5				
	Máxima	Media	Mínima	Tendencia
R2	6,5	3,5	1,5	-0,02 (***)
R5	15,0	8,6	4,1	-0,03 (***)
Total	9,6	5,7	2,8	-0,03 (***)
Escenario RCP8.5				
	Máxima	Media	Mínima	Tendencia
R2	5,6	2,7	0,8	-0,03 (***)
R5	14,2	7,1	2,9	-0,05 (***)
Total	9,2	4,6	1,6	-0,04 (***)

En valor distribuido para toda el área de estudio (Figura 4.11), promedio en los 94 años de análisis, refleja un aumento de la aridez nival en zonas de cotas bajas especialmente en las regiones al noroeste R2 (Andarax) y R3 (Fardes). De nuevo, estos valores más desfavorables aparecen para el escenario RCP8.5. Los cambios comienzan a ser destacables en áreas con cota elevada, teniendo valores similares en zonas de cota intermedia. Llegando a alcanzarse zonas en las cumbres con una variación de 90 mm/°C, respecto las zonas de menor cota.

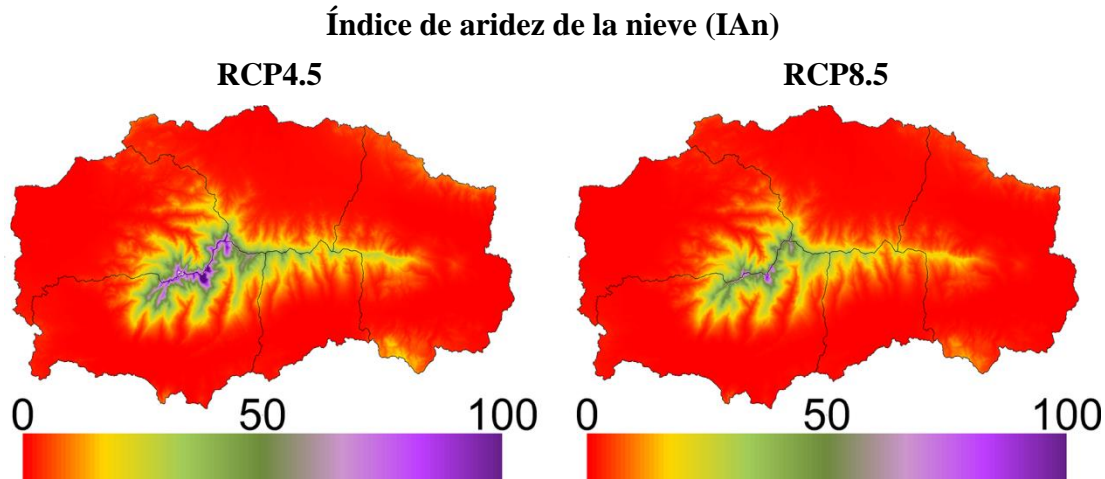


Figura 4.11 Mapa del área de estudio de la evolución del IAN al año medio para los escenarios seleccionados en el periodo de estudio 2006-2100

Índice de torrencialidadnival (ITN)

Los valores del índice de torrencialidad nival (ITN) anual para el periodo se muestran en la Figura 4.12. Aunque algo más desfavorable para el escenario RCP8.5, la evolución anual y los valores medios obtenidos para cada uno de los umbrales no difieren mucho entre escenarios. A diferencia del ITP (Tabla 4.5), las tendencias encontradas en ambos escenarios sí tienen el mismo carácter (Tabla 4.7). Estas, predicen un retraso temporal de la caída del 50% de la precipitación de nieve acumulada al año y un adelanto del resto de nieve acumulada. Por tanto, el tiempo necesario para acumular la nieve anual estaría más concentrado.

Tabla 4.7 Valores estadísticos en los umbrales seleccionados para el índice ITn en el periodo 2006-2100 para los escenarios de estudio en el área de Sierra Nevada: Tendencias medias anuales globales, valores medios, valores máximos y valores mínimos. Los resultados del análisis de tendencias se definen según el test de Mann-Kendall como (1) significancia del $\alpha=0,01$ (**); (2) significancia del $\alpha=0,05$ (*); (3) significancia del $\alpha=0,1$ (*); o (4) sin significancia, $\alpha>0,1$ (+).

ITn					
Escenario RCP 4.5					
Total		Máxima	Media	Mínima	Tendencia
	P10	122	80.76	45	0.1517 (**)
	P50	196	155.51	114	0.0450 (*)
	P75	240	204.26	147	-0.0043 (**)
	P90	268	204.35	201	0.0063 (***)
	P95	302	261.17	230	-0.0207 (***)
	P99	360	321.30	259	-0.1047 (**)
Escenario RCP 8.5					
Total		Máxima	Media	Mínima	Tendencia
	P10	125	80.40	37	0.193 (***)
	P50	216	158.70	113	0.005 (***)
	P75	236	202.54	160	-0.065 (***)
	P90	286	239.78	190	-0.1107 (**)
	P95	291	259.95	221	-0.1692 (**)
	P99	363	308.31	259	-0.3102 (***)

Si se confrontan ambos períodos analizados, referencia y, se observa como los valores medios obtenidos en ambos difieren de un valor aproximado de 50 días, siendo más favorable para el caso del estudio en el periodo de referencia. Esto supondría, un adelanto global en la acumulación de la precipitación en forma de nieve para ambos escenarios. No obstante, y en paralelo a este adelanto generalizado, existe una clara diferencia entre ambos periodos. Las primeras nieves obtenidas en el periodo de referencia tienden a ser más tempranas que las proyectadas por los escenarios futuros.

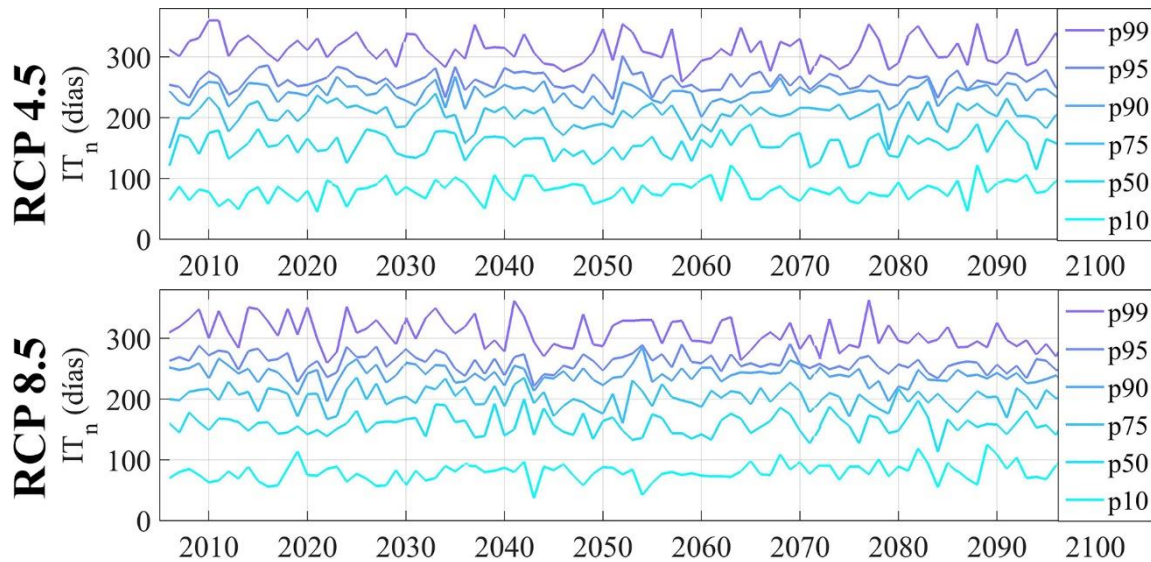


Figura 4.12 Evolución anual y por décadas del ITN para los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 en el área de Sierra Nevada para el periodo de estudio 2006-2100.

4.3.3 Análisis de los flujos de nieve

4.3.3.1 Flujos de masa en la capa de nieve

La Figura 14 representa la evolución de las anomalías (ver sección 4.2.2) en flujos de masa en la capa de nieve, fusión y evaposublimación en el periodo futuro, 2006-2100, para cada uno de los escenarios estudiados en las dos regiones seleccionadas R2 (Andarax) y R5 (Guadalfeo).

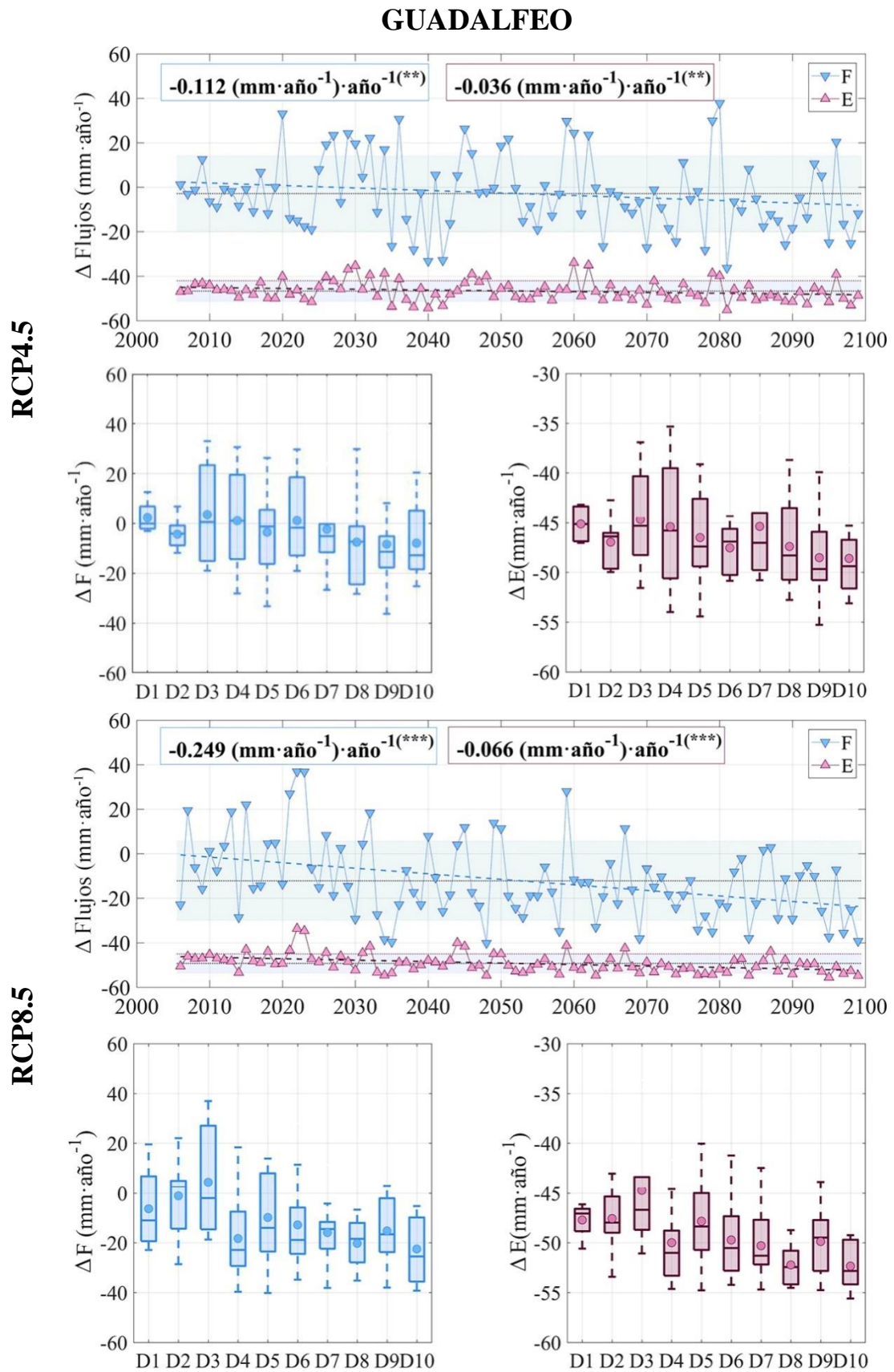


Figura 4.13 Evolución de las anomalías en los flujos de agua en la capa de nieve, fusión y evapotranspiración, para el periodo futuro en ambos escenarios para la región R5 Guadalefe.

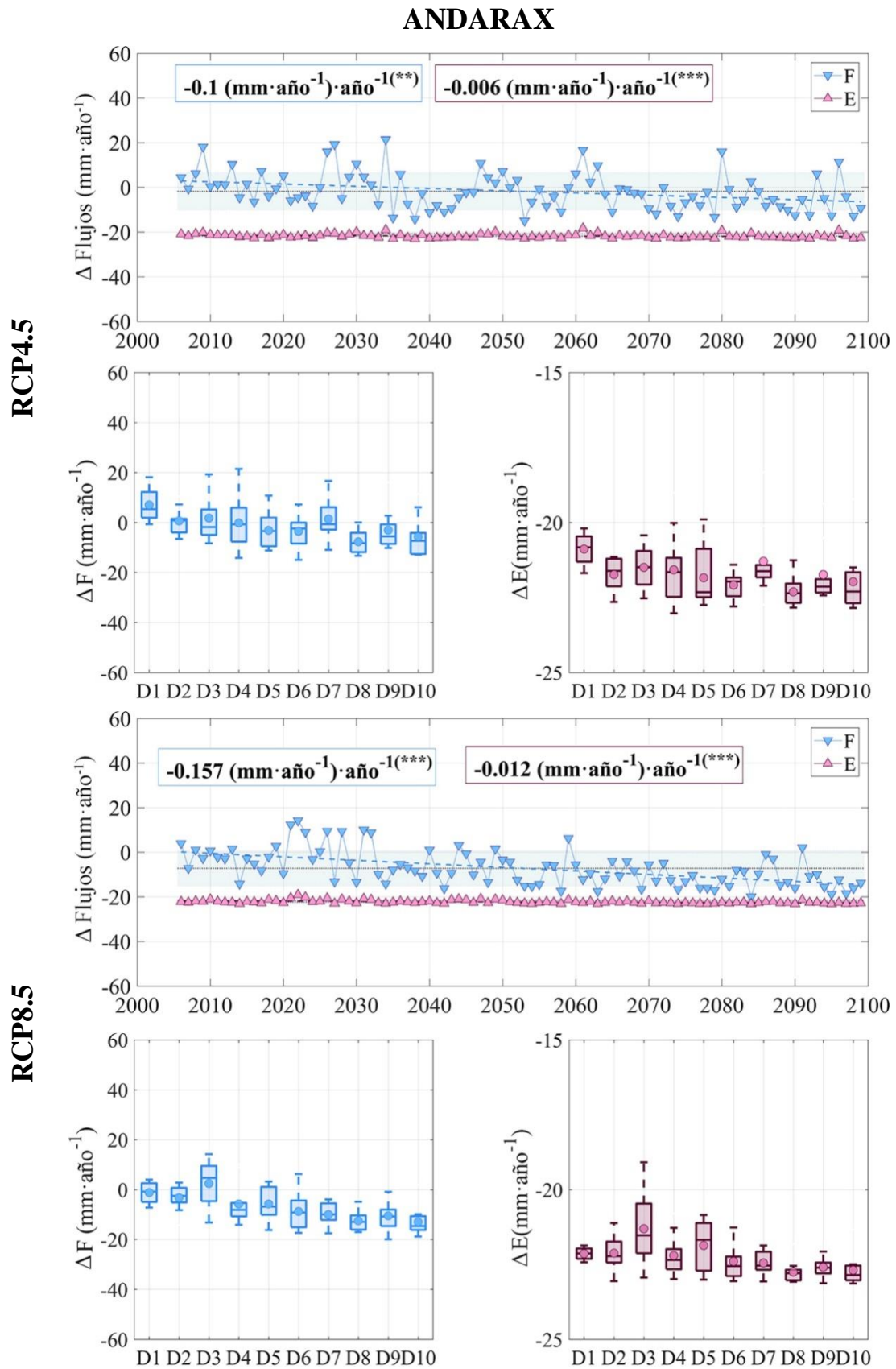


Figura 4.14 Evolución de las anomalías en los flujos de agua en la capa de nieve, fusión y evaporesublimación, para el periodo futuro en ambos escenarios para la región R2 Andarax

Para ambos escenarios se observan tendencias promediadas negativas, siendo las de fusión muy superiores a las de evaposublimación, debido la importancia relativa entre ambos flujos. En el caso de la evaposublimación, las tendencias llegan a ser el doble en la comparación entre escenarios más y menos favorables. Por otro lado, se observan además ciclos completos (crecimiento/decrecimiento), más visibles en el caso de la región Guadalfeo y para el escenario RCP4.5, de aproximadamente 40 años para ambos flujos. El estudio a escala decenal refleja también mayor dispersión para el escenario RCP4.5 en regiones y escenarios y una disminución más acentuada en las cinco últimas décadas de estudio para el caso del RCP8.5.

Tabla 4.8 Tabla resumen de los valores medios de los flujos de masa en la capa de nieve estudiadas durante el periodo 2006-2100 bajo cada uno de los escenarios analizados (RCP4.5 y RCP8.5) en las regiones de interés (R2 y R5) junto con las tendencias anuales asociadas. Los resultados del análisis de tendencias se definen según el test de Mann-Kendall como (1) significancia del $\alpha=0,01$ (**); (2) significancia del $\alpha=0,05$ (*); (3) significancia del $\alpha=0,1$ (+); o (4) sin significancia, $\alpha>0,1$ (+).

RCP4.5				
	F(mm/año)		E(mm/año)	
	Media	Tendencia	Media	Tendencia
ANDARAX (R2)	21,4	-0.102(**)	1,5	-0,006(***)
GUADALFEO (R5)	54,1	-0,112(**)	10,3	-0,036(**)
RCP8.5				
	F(mm/año)		E(mm/año)	
	Media	Tendencia	Media	Tendencia
ANDARAX (R2)	16,0	-0,157(***)	0,9	-0,012(***)
GUADALFEO (R5)	44,8	-0,249(***)	7,7	-0,066(***)

Los mapas distribuidos (Figura 4.16) muestran para la anomalía de la fusión valores de medios superiores, más pérdidas, para el escenario RCP8.5 que para el RCP4.5, debido a su grado de severidad, y para la R5 (Guadalfeo) frente a R2 (Andarax), debido a una mayor presencia de nieve en la primera. Por este motivo, es en la zona próxima a las cumbres donde se localizan las mayores pérdidas. La minimización de los efectos en R2 (Andarax) es debida a la existencia de unas condiciones iniciales de aridez más elevadas en el propio periodo de referencia. En el caso de la evaposublimación estas tendencias experimentan el mismo patrón para zonas de cumbre, con una mayor presencia de nieve. Sin embargo, para las zonas a cotas algo más bajas en las que la presencia de nieve es menos relevante, estas anomalías pueden experimentar un aumento. La ocurrencia de eventos muy esporádicos de nieve, el aumento claro de las temperaturas y el desacople a escala de evento entre ambas, pueden ser las causas de estas tendencias positivas.

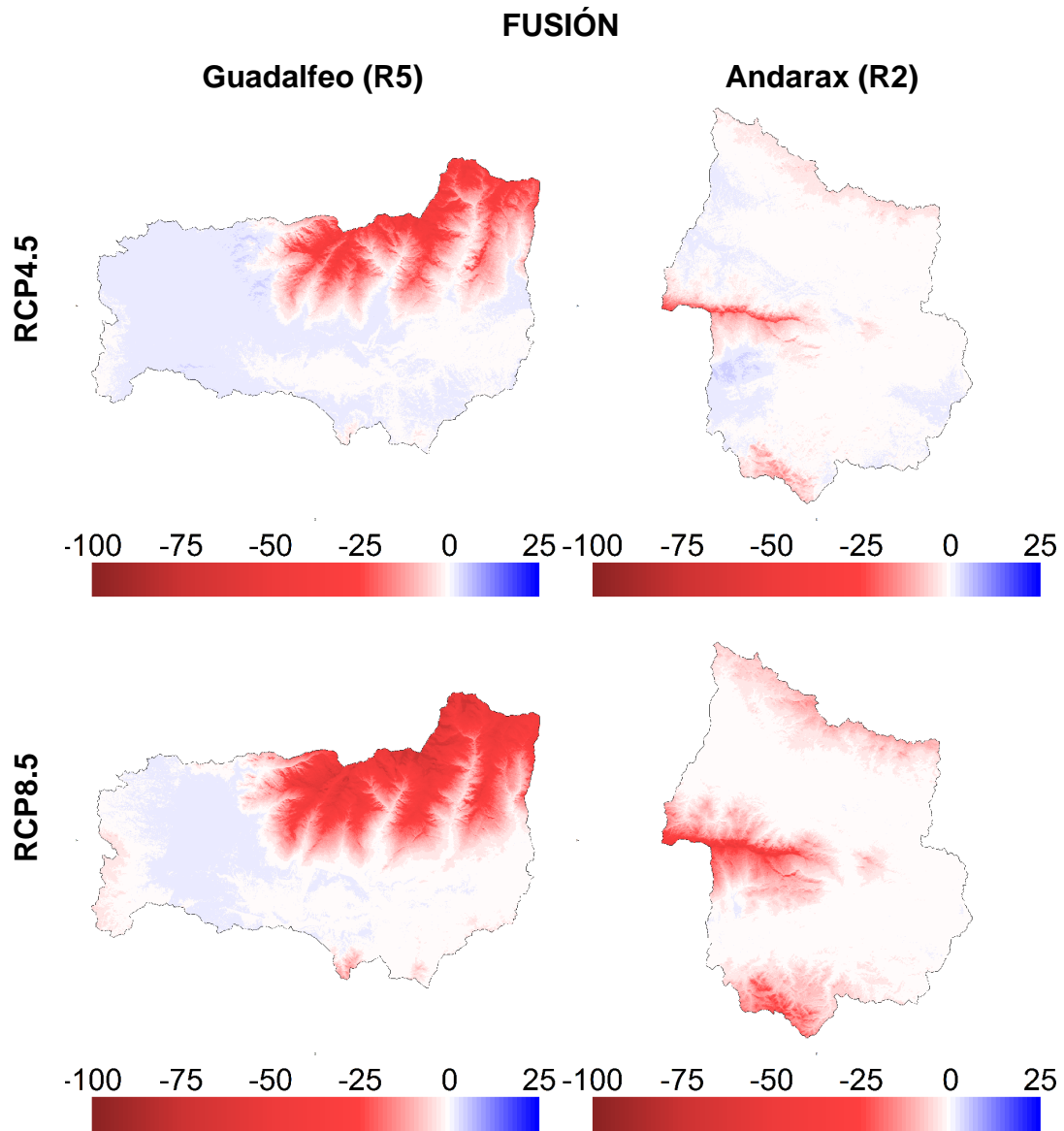


Figura 4.15 Mapa promedio de anomalías para los flujos de fusión para las regiones (R5 y R2) y los dos escenarios seleccionados.

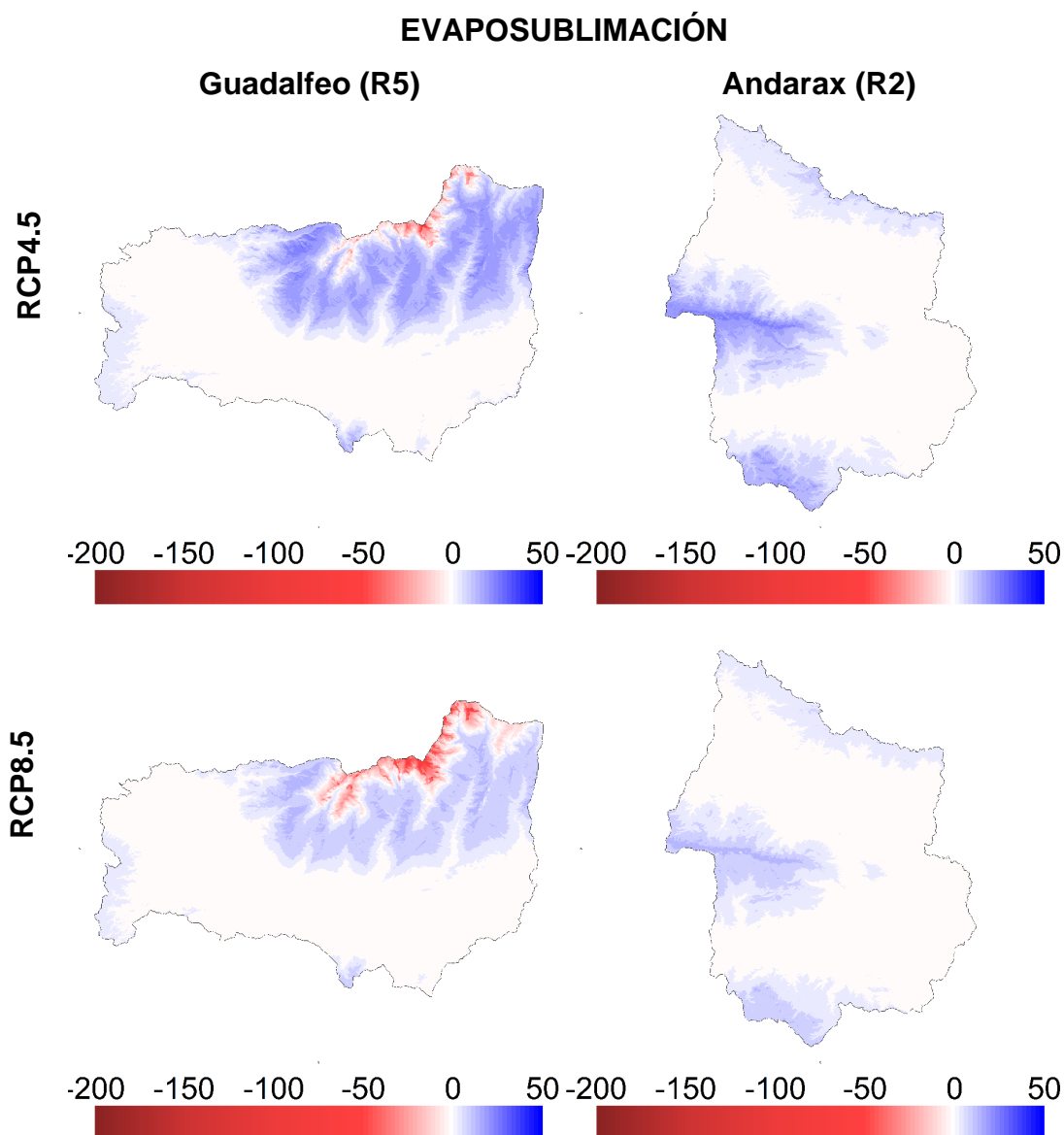


Figura 4.16 Mapa promedio de anomalías para los flujos de evaposublimación para las regiones (R5 y R2) y los dos escenarios futuros seleccionados.

4.3.3.2 Equivalente de agua

Este apartado muestra los valores de anomalías con respecto a la media del periodo histórico del equivalente de agua diario máximo y medio anual en las dos regiones de estudio para los escenarios seleccionados (R5: Figura 4.17 y R2: Figura 4.18). Se observa gran variabilidad para el equivalente de agua máximo, principalmente en la R5 (Guadálfeo), cuyos valores oscilan entre los 20 mm de anomalías para el año con más nieve hasta los -10 mm para los años más secos; es decir un rango de variabilidad que ronda aproximadamente los 30 hm^3 . Por otro lado, en esta variable queda reflejado el carácter árido de R2 (Andarax), con variaciones de no más de 2 mm, equivalentes aproximadamente a 2 hm^3 .

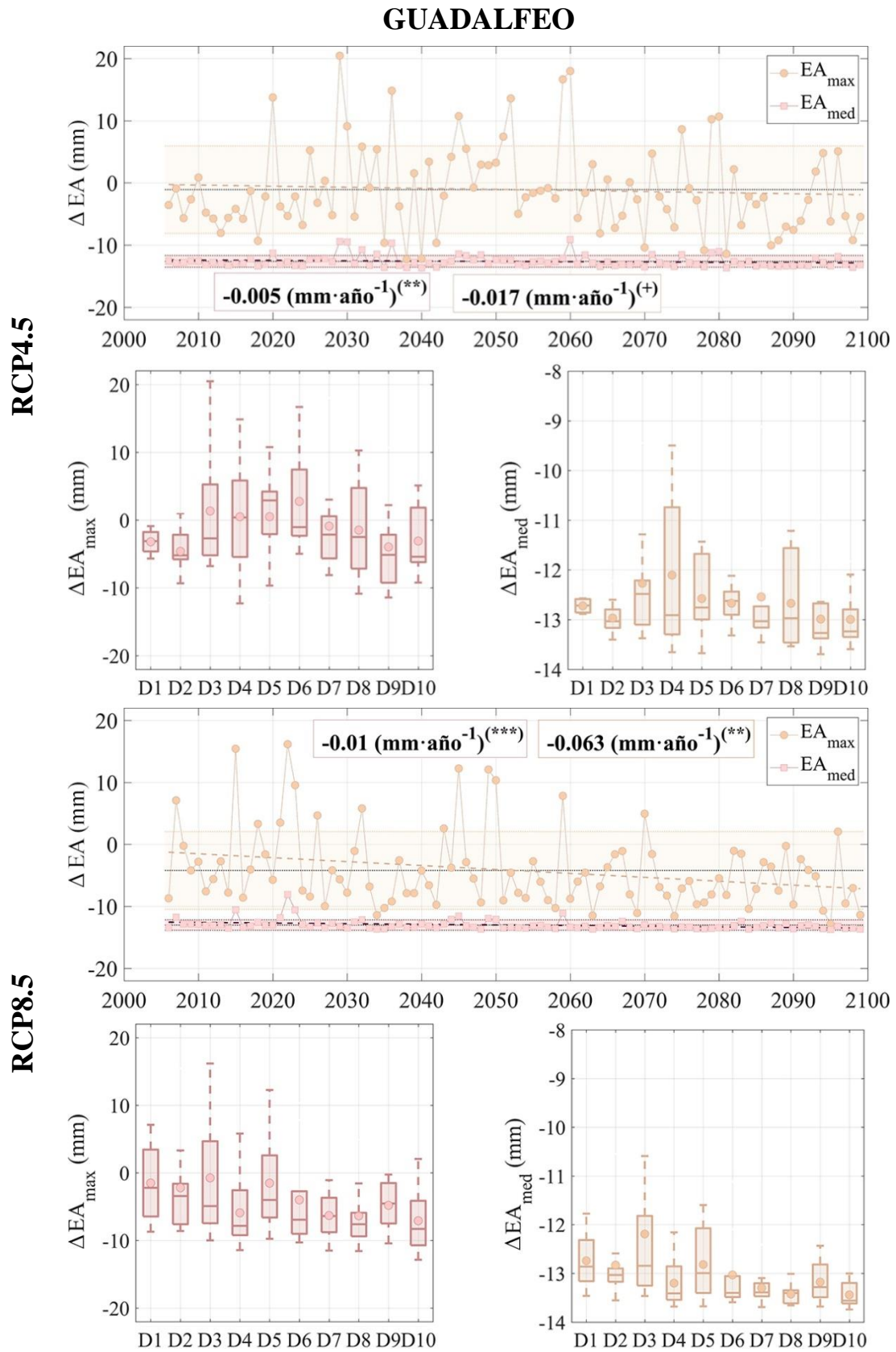


Figura 4.17 Evolución del equivalente de agua diario máximo (EA max) y medio (EA medio) en término de anomalía anual durante el periodo futuro en la región R5-Guadafeo.

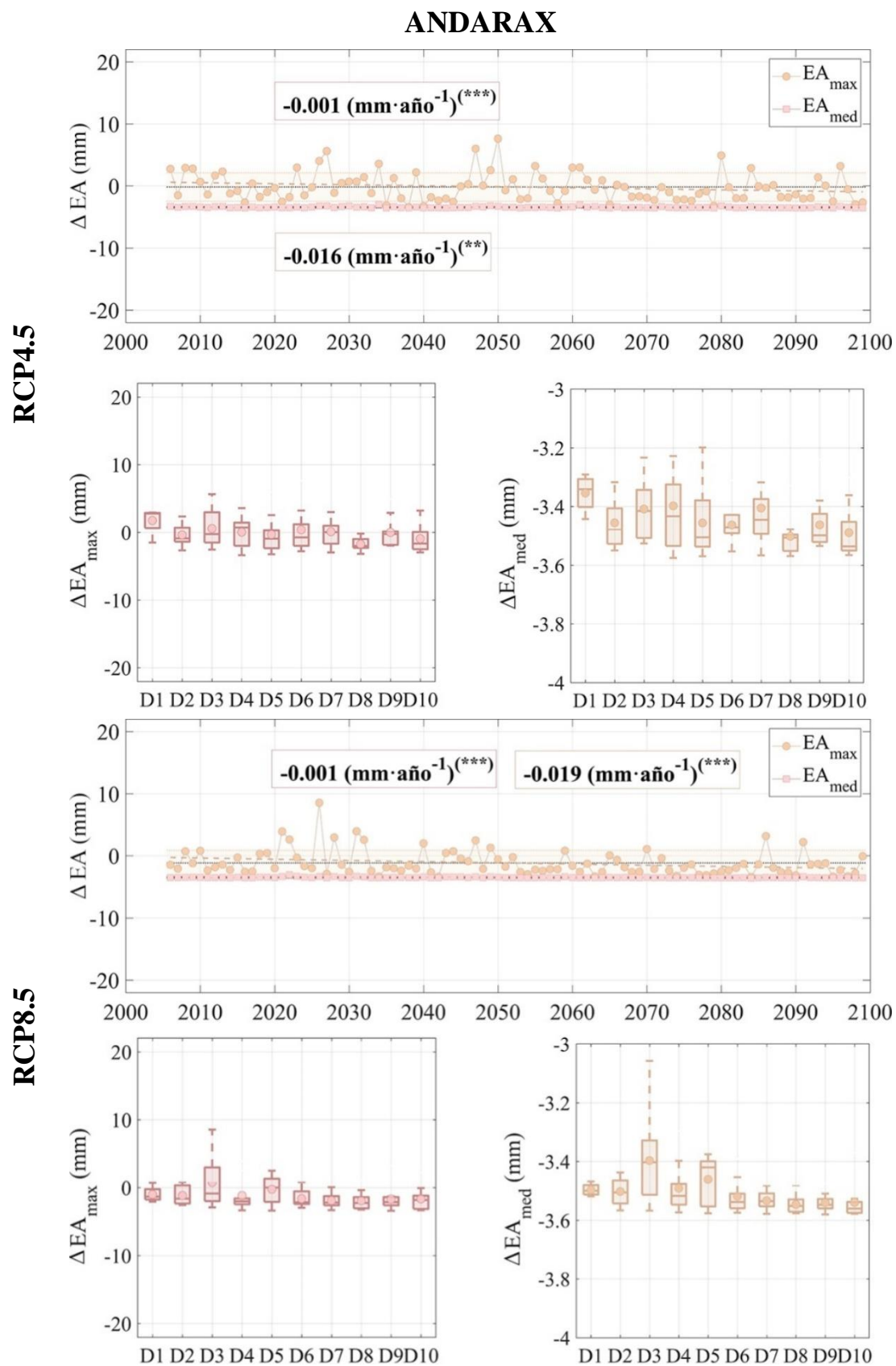


Figura 4.18 Evolución del equivalente de agua diario máximo (EA max) y medio (EA medio) en término de anomalía anual durante el periodo futuro en la región R5-Guadalefe.

Además, para ambas regiones se observan tendencias decrecientes, un orden de magnitud mayor en R5 (Guadalfeo) que en R2 (Andarax) y mayores para la variable EA_{max} y el escenario más desfavorable, RCP8.5. El análisis decenal muestra la alta variabilidad en las anomalías observada para el EA_{max} , frente a la homogeneidad del EA_{med} . Valores negativos se encontraron para todos los casos en la variable EA_{med} y en años puntuales para el caso de EA_{max} , lo que concluye que se pronostican valores superiores de EA a los encontrados en el periodo de referencia, debidos probablemente al desacople temporal en los regímenes de precipitación y temperatura.

Tabla 4.9 Tabla resumen de los valores de equivalente de agua analizados en la capa de nieve estudiadas durante el periodo 2006-2100 bajo cada uno de los escenarios analizados (RCP4.5 y RCP8.5) en las regiones de interés (R2 y R5) junto con las tendencias anuales asociadas. Los resultados del análisis de tendencias se definen según el test de Mann-Kendall como (1) significancia del $\alpha=0,01$ (**); (2) significancia del $\alpha=0,05$ (*); (3) significancia del $\alpha=0,1$ (+); o (4) sin significancia, $\alpha>0,1$ (+).

RCP4.5				
	EA_{max} (mm)		EA_{med} (mm)	
	Media	Tendencia	Media	Tendencia
ANDARAX (R2)	3,40	-0,016(***)	0,13	-0,001(***)
GUADALFEO (R5)	12,67	-0,017(+)	1,12	-0,005(**)
RCP8.5				
	EA_{max} (mm)		EA_{med} (mm)	
	Media	Tendencia	Media	Tendencia
ANDARAX (R2)	2,40	-0,019(***)	0,08	-0,001(***)
GUADALFEO (R5)	9,55	-0,063(**)	0,74	-0,01(***)

4.3.3.3 Días con nieve en superficie y Superficie cubierta de nieve.

Las Figura 4.19 y Figura 4.20 muestran la evolución de las anomalías (ver sección 4.2.2) durante el periodo 2006-2100 de las variables días de nieve en superficie y la superficie cubierta media anual para los dos escenarios seleccionados. Las anomalías observadas para DíasNS oscilan entre 10.1 y 7.5 días entre escenarios para R2 (Andarax) y 27.2 y 22.2 días entre escenarios para R5 (Guadalfeo). En el caso de SCN estos valores lo hacen entre 0.011 y 0.013 mm^2mm^{-2} entre escenarios para R2 (Andarax) y 0.04 y 0.03 mm^2mm^{-2} entre escenarios para R5 (Guadalfeo) (Tabla 4.10).

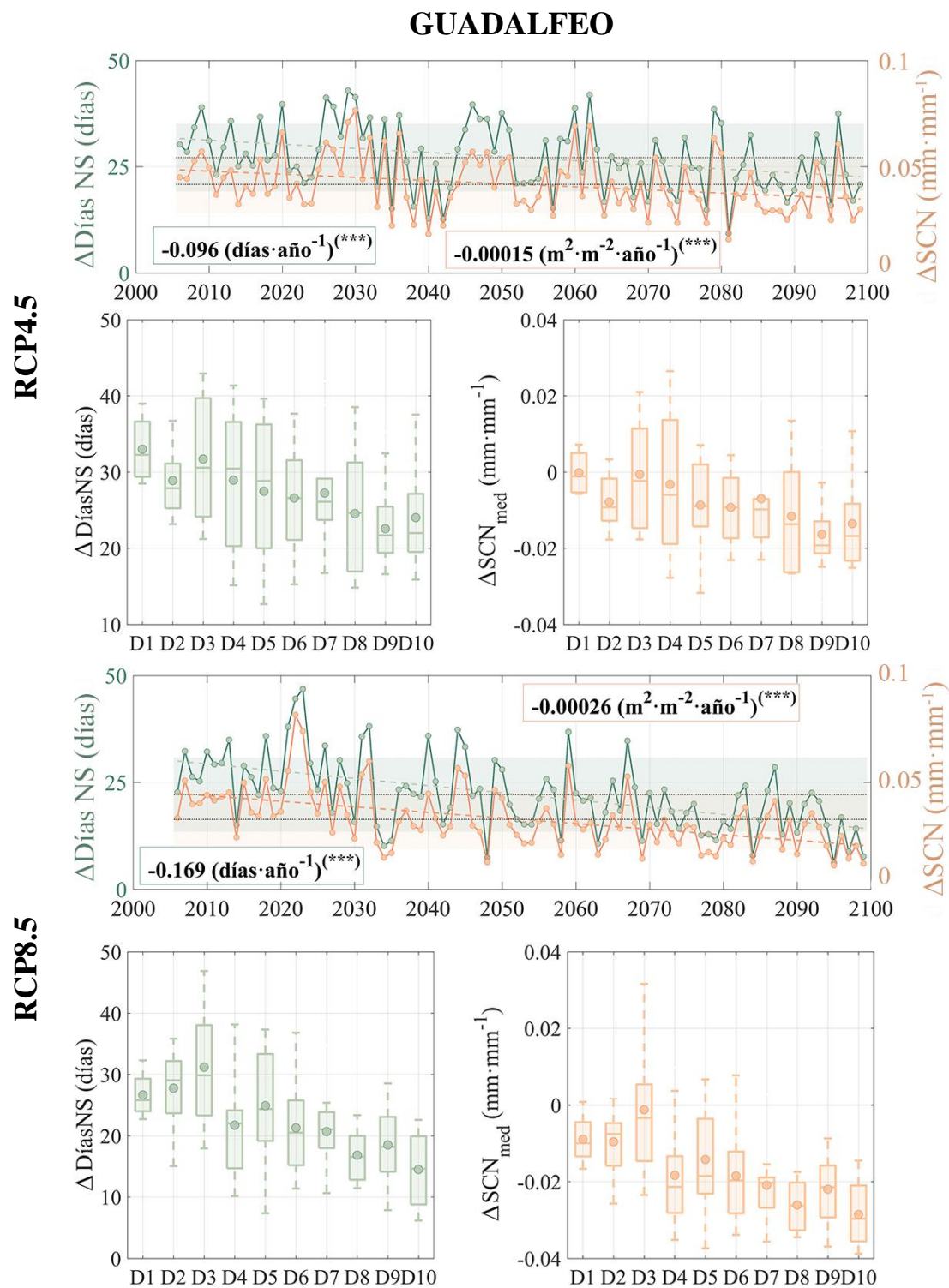


Figura 4.19 Evolución de la superficie cubierta de nieve máxima (SCN max) y media (SCN medio) anual durante el periodo de futuro en la región R5 Guadalfeo. Evolución obtenida en cada una de las regiones a escala de década: triángulo rojo: evolución decreciente; triángulo azul: evolución creciente. (Triángulo relleno, tendencia estadística con significancia $\alpha = 0.1$).

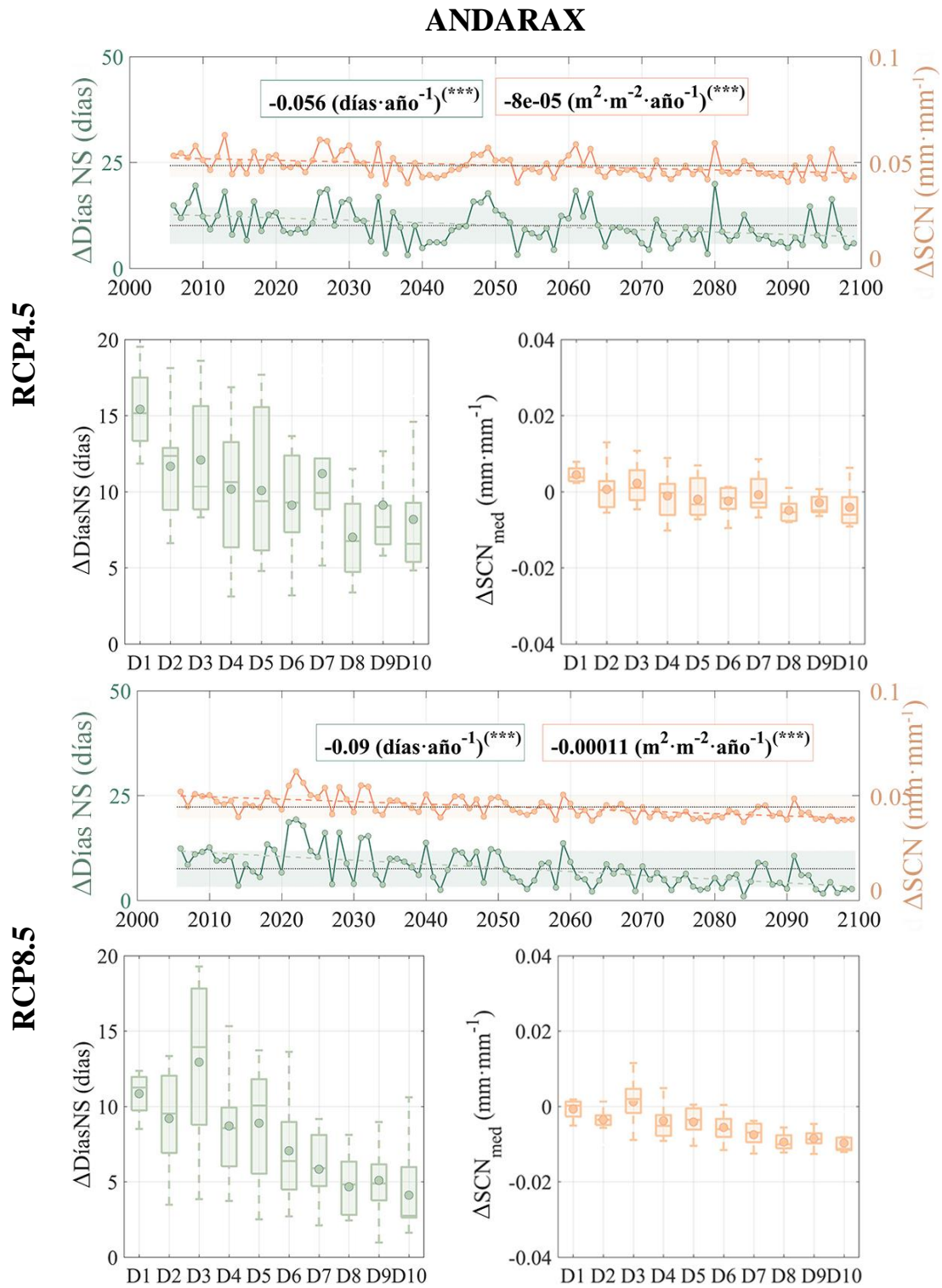


Figura 4.20 Evolución de la superficie cubierta de nieve máxima (SCN max) y media (SCN medio) anual durante el periodo de futuro en la región R2 Andarax. Evolución obtenida en cada una de las regiones a escala de década: triángulo rojo: evolución decreciente; triángulo azul: evolución creciente. (Triángulo relleno, tendencia estadística con significancia $\alpha = 0.1$).

Ambas variables se encuentran íntimamente relacionadas con anomalías y tendencias muy similares, pero valores absolutos diferenciados. Al poseer un menor número de días con nieve, las tendencias en R2 (Andarax) sus tendencias, aunque decrecientes, poseen un menor orden de magnitud que las registradas en la R5 (Guadalfeo). Los valores por décadas representan una decadencia paulatina para los cuatro casos de estudio. Aunque se observa una alternancia entre algunas décadas, pasando de décadas húmedas a secas. Hay que enfatizar como el decrecimiento es más acentuado en las cinco últimas décadas para el escenario RCP8.5 en la región del Andarax.

Tabla 4.10 Tabla resumen de los valores que analizan la persistencia en la capa de nieve estudiadas durante el periodo 2006-2100 bajo cada uno de los escenarios analizados (RCP4.5 y RCP8.5) en las regiones de interés (R2 y R5) junto con las tendencias anuales asociadas. Los resultados del análisis de tendencias se definen según el test de Mann-Kendall como (1) significancia del $\alpha=0,01$ (**); (2) significancia del $\alpha=0,05$ (*); (3) significancia del $\alpha=0,1$ (*); o (4) sin significancia, $\alpha>0,1$ (+).

RCP4.5				
	Días NS		SCN	
	Media	Tendencia	Media	Tendencia
ANDARAX (R2)	10,1	-0,056(***)	0,01	-0,00008(***)
GUADALFEO (R5)	27,2	-0,096(***)	0,04	-0,00015(***)
RCP8.5				
	Días NS		SCN	
	Media	Tendencia	Media	Tendencia
ANDARAX (R2)	7,5	-0,09(***)	0,01	-0,00011(***)
GUADALFEO (R5)	22,2	-0,17(***)	0,03	-0,00026(***)

Al igual que en los valores medios anuales, en valor promediado en todo el periodo se observa una mayor disminución de los días con nieve entre escenarios en el caso de la región Guadalfeo (Tabla 4.10), donde el área de cambio entre una hipotética situación y la otra, disminuiría considerablemente el área en la que la nieve perdura más de un determinado número de días. Los cambios comienzan a ser destacables en áreas con cota elevada, p.e. la disminución del área en la que nieve perdura más de 100 días. Llegando a alcanzarse zonas en las cumbres con una variación de 150 días. En el caso de la región de Andarax en término promediado estos cambios son prácticamente inapreciables.

Los mapas distribuidos (Figura 4.21) muestran como las anomalías presentan patrones similares para ambas variables. Siempre con valores medios inferiores, más pérdidas, para el escenario RCP8.5 que para el RCP4.5, debido a su grado de severidad, y para la R5 (Guadalfeo) frente a R2 (Andarax), debido a una mayor presencia de nieve en la primera. Los cambios son muy destacables a cotas elevadas donde las anomalías pueden llegar a alcanzar valores medios que alcanzan los 80 días. Los aumentos son prácticamente despreciables apareciendo exclusivamente en algunas zonas bajas de los valles.

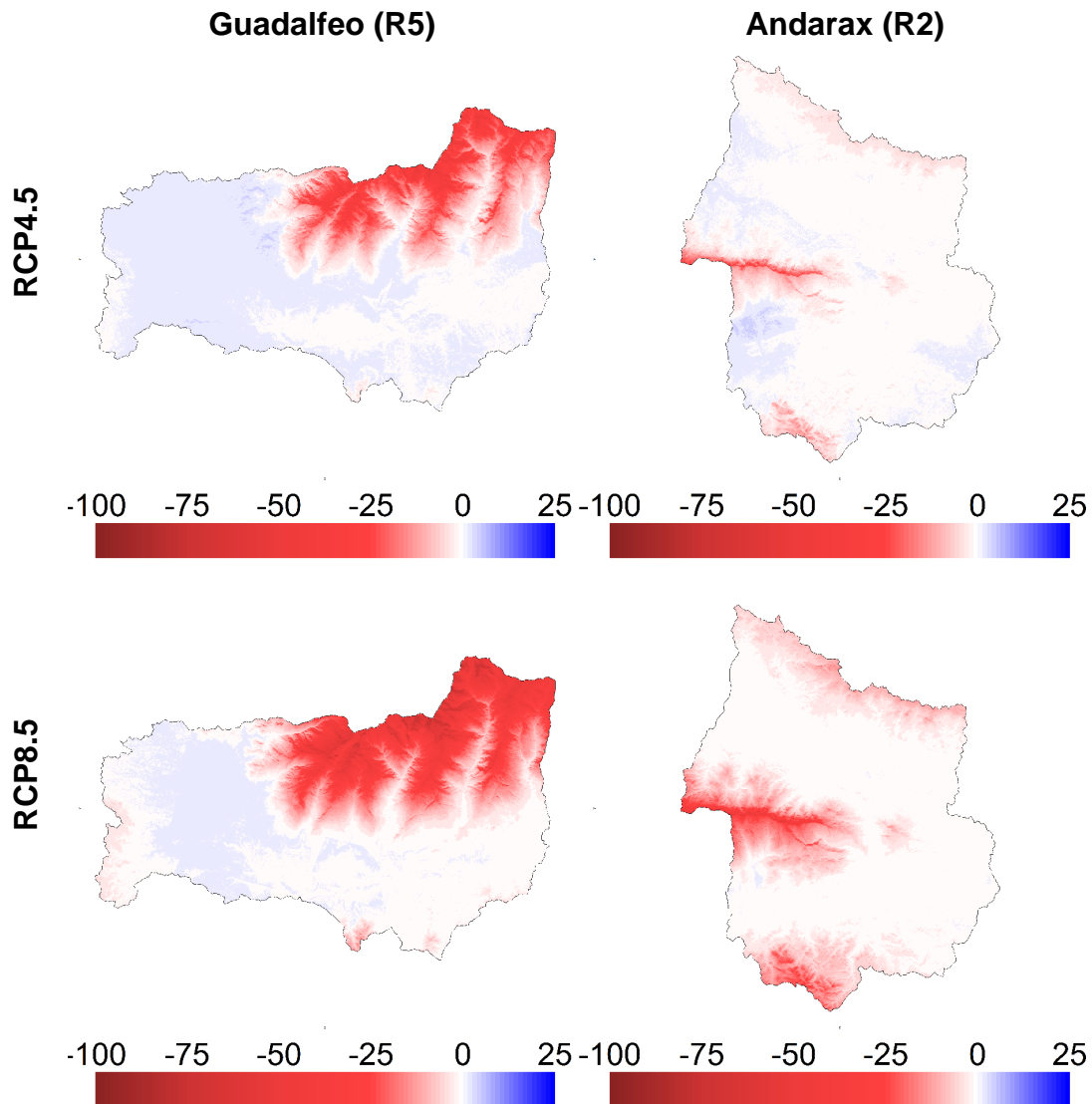


Figura 4.21 Mapas de las regiones de estudio del número de días con nieve al año medio en el periodo de estudio (2006-2100) para los escenarios seleccionados.

4.4 Discusión

El análisis realizado proporciona una estimación de los efectos a largo plazo de la evolución climática en la dinámica de la capa de nieve en el área de Sierra Nevada, como ejemplo de área semiárida de montaña (Maheras *et al.*, 1992; Shuttleworth, 1996; Esteban-Parra *et al.*, 1998). Los dos escenarios elegidos para el análisis difieren en gran medida en el alcance de los impactos estimados sobre la ocurrencia y cantidad de nieve a escala anual y por década. Como era de esperar, el escenario más severo, RCP8.5, presenta mayores impactos en términos de anomalías, algo encontrado en análisis similares en diferentes estudios alrededor del mundo (Gampe *et al.*, 2016; Tan *et al.*, 2017; Molina-Navarro *et al.*, 2018). A pesar de que la evolución decreciente de la precipitación no muestra tendencias significativas con confianza superior al 95%, el régimen de nevadas resultante para cada escenario sigue una tendencia decreciente significativa (nivel confianza 99%) asociada con la tendencia creciente significativa (nivel de confianza 99%) a largo plazo de la temperatura.

Esta tendencia general significativa asociada al incremento de la temperatura en escenarios climáticos futuros ha sido observada en diferentes análisis de impacto climático en otras regiones de alta montaña, como los Alpes y el Himalaya (Diffenbaugh *et al.*, 2013; Marty *et al.*, 2017; Dimri *et al.*, 2018; Verfaillie *et al.*, 2018), así como en otras zonas montañosas semiáridas de Chile (Andes) y en California (Sierra Nevada) (Vicuña *et al.*, 2011; Meza *et al.*, 2012; Cayan *et al.*, 2013). Se han encontrado valores similares de las tendencias estimadas de la temperatura media para los Alpes (0.22 y 0.58 °C/década para los RCPs 4.5 y 8.5, respectivamente), Sierra Nevada (0.18 y 0.46 °C/década para los RCPs 4.5 y 8.5, respectivamente), y Chile (donde se ha obtenido un aumento de 3 a 4 °C para el siglo XXI). Sin embargo, las tendencias resultantes en cuanto a temperatura mínima son más bajas que las obtenidas para estas otras regiones (por ejemplo, 0.3 y 1.1 °C/década para los RCP4.5 y RCP8.5, respectivamente, en el Himalaya y 0.08 y 0.26 °C/década para los RCP4.5 y RCP8.5, respectivamente, en Sierra Nevada). Este valor más bajo se debe probablemente a los diferentes rangos de altitud entre ambas localizaciones, aunque los efectos de escala asociados con el *downscaling* en Sierra Nevada también podrían influir en gran medida en los resultados finales. Además, las tendencias de temperatura máxima muestran comportamientos diferentes entre ambas áreas (por ejemplo, 0.20 y 0.30 °C/década para los RCP4.5 y RCP8.5, respectivamente, en el Himalaya y 0.21 y 0.66 °C/década para los RCPs 4.5 y 8.5, respectivamente, en Sierra Nevada).

La falta de significancia estadística en el análisis de tendencias de la precipitación también ha sido publicada en varios artículos de investigación (Mohaghan *et al.*, 2008; Valdés-Pineda *et al.*, 2014; Berg *et al.*, 2015; Kay, 2016; Polade *et al.*, 2017), con valores de tendencia decreciente más altos observados durante el siglo XXI bajo condiciones semiáridas (i.e. -9% y -19% para los RCPs 4.5 y 8.5, respectivamente, en los Andes chilenos y -1.5% y -5.5% para los RCPs 4.5 y 8.5, respectivamente, en Sierra Nevada). Estos resultados también muestran, como era esperado, una aparente disminución de la precipitación en forma de nieve en todos los escenarios futuros (Demaria *et al.*, 2013; Diffenbaugh *et al.*, 2013; Kay, 2016; Sun *et al.*, 2016; Marty *et al.*, 2017; Mudryk *et al.*, 2018), con una mayor pérdida de nieve en áreas con alturas superiores a los 1500 m.s.n.m. pero con un mayor impacto en áreas más bajas donde la nevada podría no ocurrir en el futuro (Meza *et al.*, 2012; Diffenbaugh *et al.*, 2013; Demaria *et al.*, 2013). Los impactos resultantes en la precipitación en forma de nieve varían mucho en función de las diversas localizaciones. Por ejemplo, se encontraron tendencias decrecientes de 32 y 65 mm/década en los Alpes para los RCPs 4.5 y 8.5 (Verfaillie *et al.*, 2018), las cuales fueron mayores que las encontradas en Sierra Nevada. Sin embargo, en valores relativos, estos resultados están más cerca de la disminución de década de la precipitación en forma de nieve estimada en Canadá (Mudryk *et al.*, 2018), que son el 5 y el 10% de los valores de décadas actuales para los RCP4.5 y 8.5, respectivamente. Esto está en línea con el 2,8 y el 6,1% obtenido para los mismos escenarios en Sierra Nevada. Un resultado clave de este análisis es el probable impacto de los escenarios climáticos en la torrencialidad la nieve. A pesar de que la tendencia media anual es una disminución durante el periodo de estudio, los valores extremos anuales de la precipitación en forma de nieve en cada década muestran una variabilidad extremadamente alta, con grandes amplitudes bajo ambos escenarios en la mayoría de las regiones. Estas variaciones podrían ser debidas a un posible desacople entre los regímenes de precipitación y temperatura ampliado por las técnicas de *downscaling* utilizadas.

Los resultados de la Tabla 4.11, que muestran la proporción entre los valores medios de cada variable a lo largo de todo el periodo de tiempo futuro en los escenarios RCP8.5 y RCP4.5 para cada región y, a su vez, para toda el área de estudio. Mientras que la relación entre la

temperatura máxima y media y la precipitación es muy similar entre regiones, la relación entre la temperatura mínima muestra claras diferencias que se asocian con la frecuencia de la precipitación en forma de nieve en cada región. Esto tiene un gran impacto en la precipitación en forma de nieve bajo cada escenario, con proporciones que difieren entre regiones. En relación a las variables utilizadas para el estudio de la dinámica de la nieve, pueden observarse ratios similares entre regiones para las variables relacionadas con volumen (EAméd, EAmáx). En el caso de la persistencia, también para la superficie cubierta de nieve (SCN), pero no para los días, donde para la R2 (Andarax) ambos escenarios arrojan resultados similares, parece por tanto haberse alcanzado unas condiciones limitantes incluso para el escenario más favorable. En el caso de los flujos, los ratios son mayores para la evaposublimación y la R5 (Guadálfeo) con mayor presencia de nieve.

Tabla 4.11. Ratio entre la media de los valores absolutos de los dos escenarios analizados para cada una de las variables de interés a lo largo del periodo futuro de estudio (RCP4.5/RCP8.5)

	Tmax	Tmed	Tmin	P	Pn	F	E	EAméd	DíasNS	SCN
ADRA (R1)	1,045	1.081	1,619	0.924	1.005	-	-	-	-	-
ANDARAX (R2)	1,044	1.078	1,413	0.948	0.944	0,747	0,600	0,615	1,002	0,742
FARDES (R3)	1,046	1.082	1,709	0.944	1.052	-	-	-	-	-
GENIL (R4)	1,049	1.080	1,480	0.928	1.042	-	-	-	-	-
GUADALFEO(R5)	1,045	1.084	2,051	0.919	1.020	0,828	0,747	0,657	0,816	0,750
TOTAL	1,046	1.081	1,590	0.933	1.057	-	-	-	-	-

La Figura 4.22 resume las diferencias regionales encontradas en el área de estudio, tanto para las anomalías medias anuales de las variables objetivo, como para sus tendencias medias anuales. Se puede observar claramente cómo tanto tendencias de la temperatura son similares espacialmente y unas anomalías con valores cercanos, mientras que el patrón de precipitación es variable tanto para los valores de anomalías como para sus tendencias. La distribución de la precipitación en forma de nieve resultante es por lo tanto menos variable que la precipitación al verse amortiguada por la temperatura.

Finalmente, el caso de las variables asociadas a la dinámica de la nieve se muestra en la Figura 4.23. Una clara diferencia es observada entre regiones, con anomalías y tendencias siempre mayores para la R5 (Guadálfeo) debido a la mayor importancia de la nieve en esta región y a su menor aridez que la hace más vulnerable al efecto del aumento de las temperaturas.

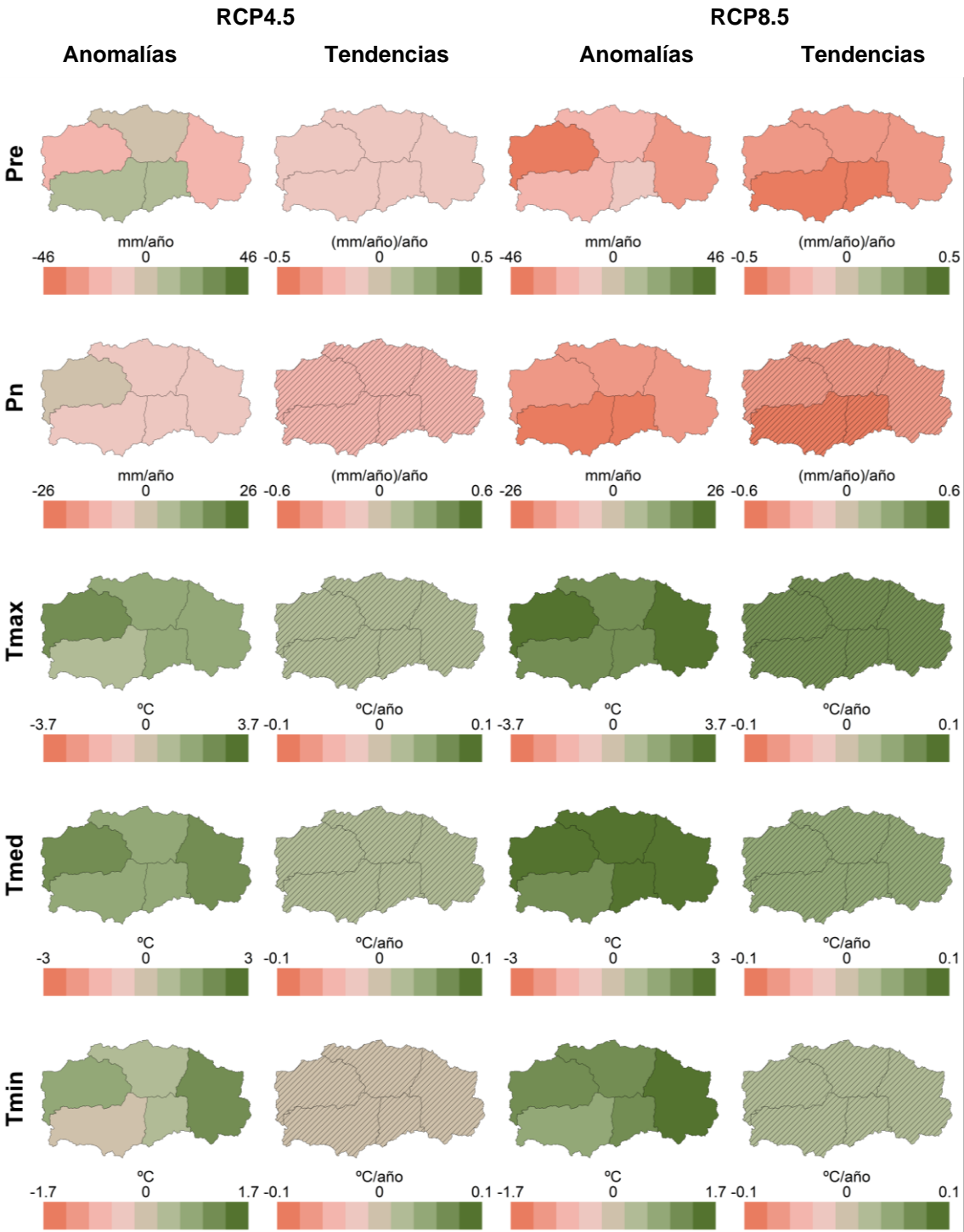


Figura 4.22 Distribución regional en Sierra Nevada de los valores medios anuales de las anomalías para las variables meteorológicas analizadas, junto con su tendencia media global durante el futuro periodo de estudio 2006-2100 para ambos escenarios RCP4.5 y RCP8.5.

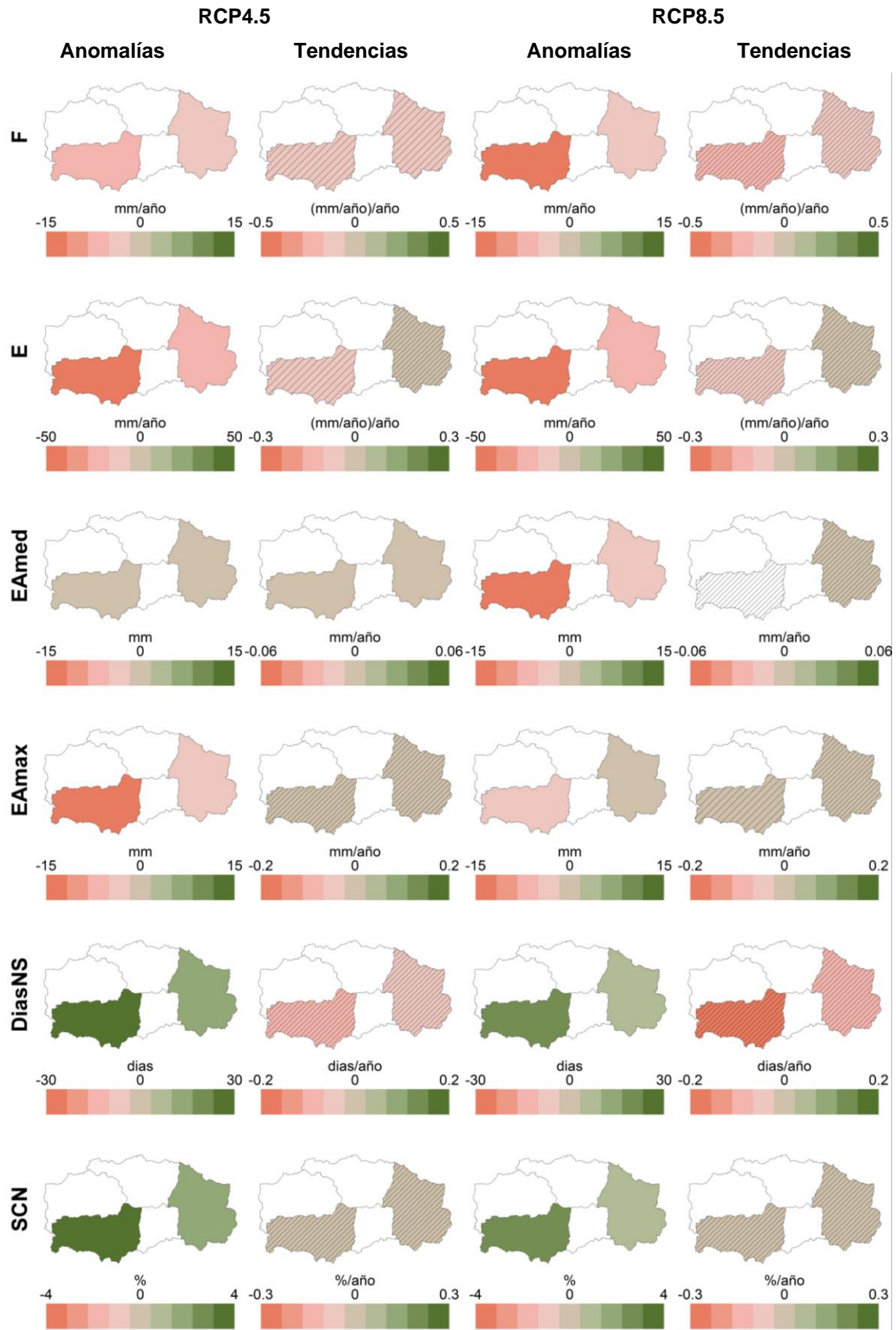


Figura 4.23 Distribución regional en Sierra Nevada de los valores medios anuales de las anomalías para las variables asociadas a la dinámica de la nieve, junto con su tendencia media global durante el futuro periodo de estudio 2006-2100 para ambos escenarios RCP4.5 y RCP8.5.

Remarcar las limitaciones de los resultados descritos anteriormente, asociadas principalmente con la capacidad de los modelos climáticos y técnicas de *downscaling* para reproducir la alta variabilidad de los regímenes meteorológicos en áreas complejas. A pesar de ello, los resultados están alineados con los proyectados durante el siglo XXI en otras regiones de alta montaña y proporcionan la primera evaluación distribuida de los impactos de futuros escenarios climáticos sobre la nevada en Sierra Nevada.

4.5 Conclusiones

Los resultados indican una disminución global de precipitación anual en forma de nieve, con una tendencia significativa que oscila entre 0,21 y 0,55 (mm-año⁻¹)-año⁻¹ y cambia según el escenario y la región de la zona. El mayor impacto del clima en el régimen de nevadas se refleja en el carácter torrencial de la ocurrencia de nevadas, con una disminución en el número de días con nevadas y un aumento significativo en la intensidad media global de nevadas en ambos escenarios. Esta torrencialidad se acentúa más en la región semiárida de Andarax, en Sierra Nevada, zona actualmente menos influenciada por la nieve. Esto puede tener un impacto relevante en el régimen fluvial, que actualmente se caracteriza por flujos no perennes, junto con la ocurrencia de eventos de crecidas repentinas.

Los indicadores de aridez y torrencialidad media analizados para la precipitación y la precipitación en forma de nieve muestran una tendencia hacia una mayor aridez en las dos regiones estudiadas en Sierra Nevada, con distinto grado de significancia según el escenario de emisiones. Sin embargo, esta tendencia se ralentiza con el tiempo bajo ambos escenarios manteniéndose en valores en torno a 20 y 25 para Andarax y Guadalfeo, respectivamente, al final del periodo futuro; esto no se observa tan patente en las proyecciones del índice de aridez de la nieve, que muestra una tendencia decreciente significativa en ambas regiones a escala decenal para los dos escenarios analizados, con reducciones superiores al 50% desde el inicio del periodo. A escala distribuida, las cumbres pierden significativamente su carácter húmedo, sobre para el escenario más severo de emisiones, con zonas que pierden heterogeneidad y quedan clasificadas bajo el umbral de semiárido en toda la región.

La pérdida de nieve generalizada causa anomalías negativas en los valores medios de los flujos anuales evaposublimación, y anomalías muy variables y de signo cambiante del flujo anual de fusión en ambas regiones, Andarax y Guadalfeo, con tendencia decreciente en todos los casos y escalas. El análisis distribuido de ambos flujos a lo largo de cada región muestra una disminución generalizada de fusión en toda el área para ambas regiones, y un aumento generalizado de la evaposublimación en las zonas de mayor cota en la región de Andarax y un comportamiento mixto en la región de Guadalfeo, en la que las cumbres pierden mayor cantidad de nieve y presentan anomalías negativas de evaposublimación frente a las bandas de cota más bajas del dominio de la nieve que ven incrementadas sus tasas anuales de evaposublimación. Esta distribución es relevante para evaluar el impacto en el régimen fluvial de los escenarios futuros de emisiones ya que el volumen de agua de evaposublimación constituye una pérdida de agua hacia la atmósfera desde la capa de nieve que no se incorpora a corto plazo al sistema fluvial local, con la merma consiguiente de recursos hídricos a escala de cuenca.

Las proyecciones climáticas no son pronósticos, sino más bien diferentes caminos probables a largo plazo que pueden seguir las variables climáticas, ya que están impulsadas por la dinámica a largo plazo del sistema de circulación global en la Tierra bajo diferentes escenarios de emisión. A las incertidumbres asociadas con la estimación de la ocurrencia de nevadas a partir de los supuestos realizados en este trabajo se suman a las incertidumbres en los modelos globales, las técnicas de *downscaling*, los algoritmos de interpolación espacial y los conjuntos de datos observacionales. Sin embargo, las tendencias de nevadas proyectadas en el área de Sierra Nevada muestran cómo el clima impacta en el régimen de nieve en el Mediterráneo y otras regiones semiáridas que son altamente dependientes de la tendencia hacia la torrencialidad observada en el régimen de precipitaciones en estas áreas. Estas tendencias se centran en los regímenes de valores extremos de las variables de precipitación y temperatura, más que en el régimen de valores medios.

Además, los resultados del análisis espacial ponen de relieve la gran heterogeneidad de estos impactos a escala local y señalan la necesidad de una modelización de alta resolución para obtener más información relacionada con el régimen de nieve, como la escorrentía y el caudal de los ríos, la humedad del suelo, los patrones de distribución de la vegetación, las tasas de erosión, la temperatura del agua y la recarga de las aguas subterráneas.

Conclusiones Bloque II

El análisis de la dinámica de la capa de nieve muestra el impacto en Sierra Nevada de las tendencias evaluadas en el Bloque I sobre el balance de agua y energía en la capa de nieve durante el periodo de estudio, impacto que afecta a los flujos de fusión y evaposublimación tanto en valor absoluto como en su importancia relativa en la ablación de la capa de nieve durante el año. La variabilidad a diferentes escalas temporales de estas tendencias y la heterogeneidad espacial ya demostrada se reflejan de nuevo en la distribución espaciotemporal de estos flujos de agua que, en general, suponen una pérdida de agua de fusión a escala anual y decenal en todas las regiones. La fracción de evaposublimación muestra cómo la tendencia a una mayor torrencialidad media genera un aumento en dicha variable, que no está directamente relacionado con la disminución del volumen de fusión. Todo ello condiciona una menor persistencia de la nieve en la superficie del terreno, expresada tanto como superficie cubierta como en días con nieve en superficie, y una tendencia verosímil en el futuro hacia la desaparición de la nieve en las regiones más áridas, como la región de Andarax.

El análisis de impactos de las tendencias climáticas proyectadas bajo dos escenarios futuros de emisiones del informe AR5 del IPCC arroja conclusiones similares en cuanto a la pérdida de nieve en la zona de estudio, con diferente nivel de impacto según la severidad del escenario estudiado. Una vez alcanzado un nivel umbral de menor persistencia de la nieve, las tendencias asociadas para los flujos de fusión y evaposublimación a escala regional están dominados por la cantidad de nieve disponible.

El impacto global de las tendencias del régimen de precipitación en forma de nieve y de los regímenes de precipitación y temperatura en la zona de estudio se expresa como una pérdida de la dominancia de la nieve y su representatividad en esta singular zona de montaña; no obstante, los procesos responsables a escala espacial son variables y condicionan el mayor o menor grado de aridificación de nieve en Sierra Nevada, así como el impacto cuantitativo en el régimen hidrológico de las cuencas asociadas.

No obstante, la variabilidad manifestada en el régimen de precipitación en forma de nieve durante las dos últimas décadas no hace inverosímil un escenario de cambio de tendencias a corto y medio plazo, si bien sin que existan elementos fundados que apunten hacia una recuperación de las condiciones de nieve de forma estable; más bien, la aparente tendencia a la torrencialidad en la zona de estudio en general y en las bandas de cota de nieve en particular traería asociada una pérdida continuada del volumen de agua de nieve que se aporta de forma directa a los recursos hídricos superficiales y subterráneos. Todo ello plantea la necesidad urgente de avanzar en la planificación de estrategias de alerta temprana y adaptación a los escenarios futuros más plausibles basados en análisis de tendencias rigurosos con soporte en un planteamiento físico de los procesos a las escalas representativas.

ANEJOS

Appendix A: Test estadístico Mann-Kendall

El test de Mann –Kendall es uno de los test estadísticos más utilizados a la hora de determinar tendencias en estudios hidroclimáticos, de hecho, es el test recomendado por la organización mundial de Meteorología (WMO) para la detección de tendencias en sus estudios. Es frecuentemente empleado entre otras razones por considerar la distribución estadística de los datos además de considerar los *outliers*. El test estadístico del test (S) se puede calcular mediante las ecuaciones (A1.1 y A1.2), donde n representa el tamaño de la muestra siendo x_i y x_k son datos secuenciales de las series analizadas.

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \cdot \sum_{j=i+1}^n \text{signo}(x_i - x_k) \quad (\text{A1.1})$$

$$\text{signo}(x_i - x_k) = \begin{cases} +1 & \text{si } (x_i - x_k) > 0 \\ 0 & \text{si } (x_i - x_k) = 0 \\ -1 & \text{si } (x_i - x_k) < 0 \end{cases} \quad (\text{A1.2})$$

La varianza de S es estimada como,

$$\text{ar}(S) = \frac{s(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^q t_p(t_p-1)(2t_p+5)}{18} \quad (\text{A1.3})$$

donde t_p define percentiles de los pares de valores, y q representa el número de valores con el mismo valor. El test estadístico estandarizado para el test de Mann – Kendall (Z) puede calcularse mediante la ecuación (5):

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{cuando } S > 0 \\ 0 & \text{cuando } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{cuando } S < 0 \end{cases} \quad (\text{A1.4})$$

El signo de Z indica la dirección de la tendencia. El valor negativo de Z indica una tendencia decreciente y viceversa.

Se asume como hipótesis nula: tendencia no monótona (H_0), evaluada frente a la hipótesis alternativa: presencia de una tendencia monótona (H_1). Se utilizan diferentes niveles de significación (alpha) para definir la aceptación de la hipótesis (significancia excelente: $\alpha=0.01$; Significancia buena: $\alpha=0.05$; Significancia aceptable: $\alpha=0.01$). Considerando alpha inferior a 0,15 para definir la región de rechazo.

Appendix B: Zonificación dentro del área del Parque Nacional y Natural de Sierra Nevada

Tal y como se ha descrito en el cuerpo de la tesis, el área de estudio ha sido dividida en 5 regiones coincidiendo con las 5 principales cuencas hidrográficas en la zona. El presente anejo recoge el comportamiento de las variables meteorológicas: precipitación, temperatura (máxima, media y mínima) y precipitación en forma de nieve, en régimen de magnitud y ocurrencia. Además de las principales variables descriptoras del estado de la nieve: Flujos (Evaposublimación y Fusión); Volumen (SWEmedio y SWEmáximo); y Persistencia (días con nieve en superficie y superficie cubierta por nieve). Los resultados se muestran a escala anual y por distribuciones de los valores anuales correspondientes a cada década analizada para el periodo comprendido entre los años hidrológicos 1961-2015.

Variables meteorológicas

Precipitación (P)

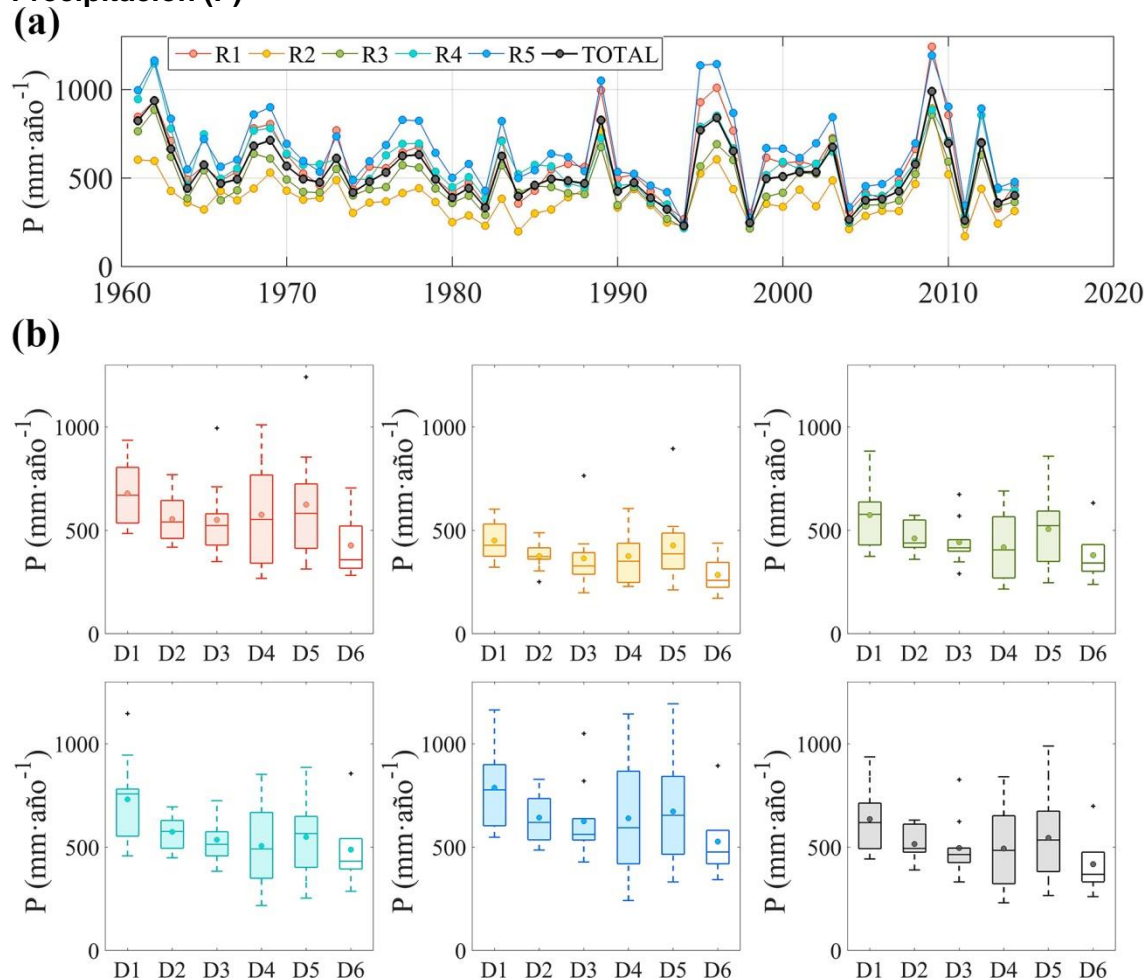


Figura A1. Evolución P (a) y por décadas (b) en las cinco regiones seleccionadas en el área de estudio: Rojo: R1, Adra; Naranja: R2, Andarax; Verde: R3, Fardes; Celeste: R4, Genil; Azul: R5, Guadalfeo; Negro: área de estudio total.

Días de Precipitación (Dpre)

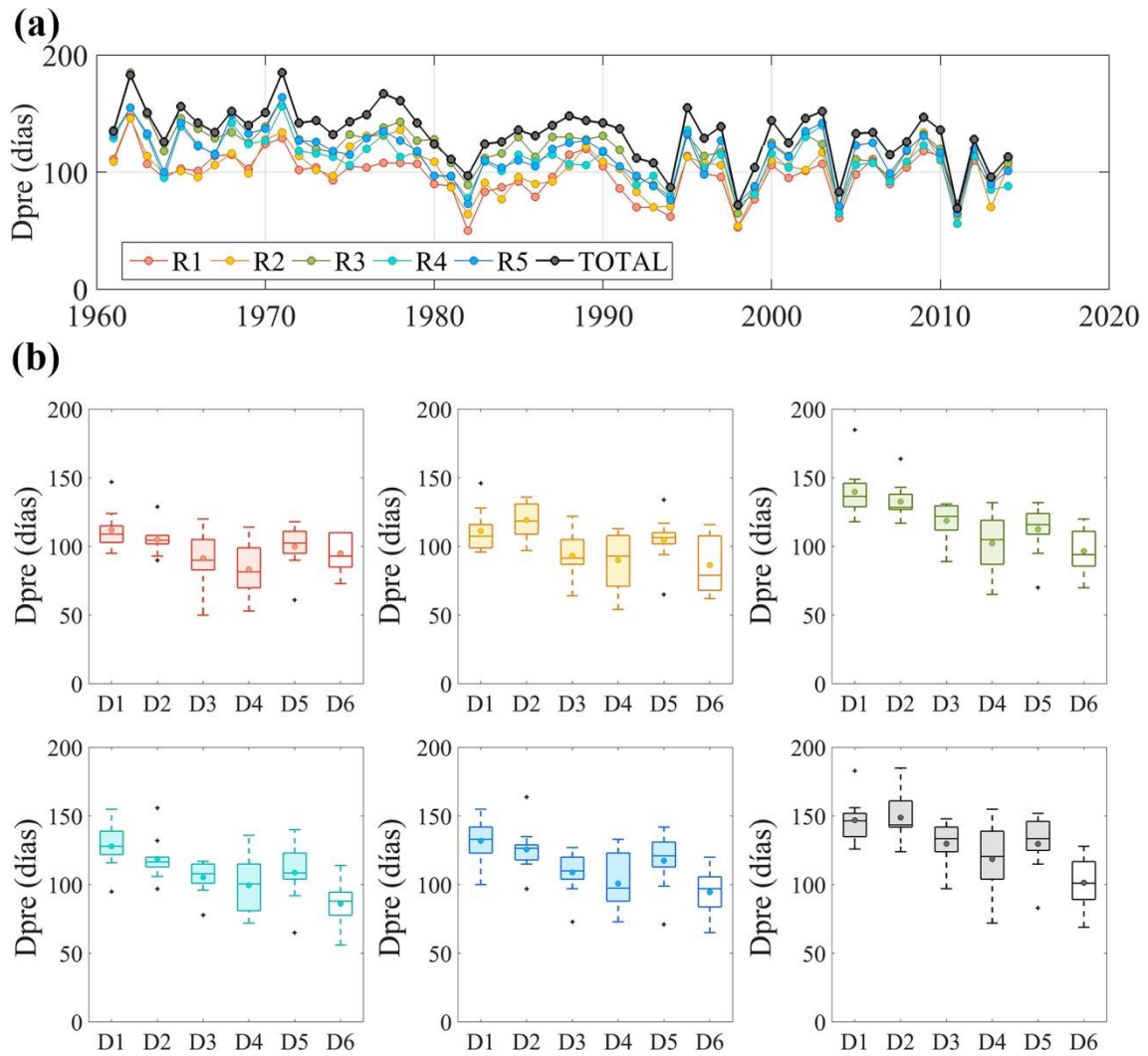


Figura A2. Evolución Dpre (a) y por décadas (b) en las cinco regiones seleccionadas en el área de estudio: Rojo: R1, Adra; Naranja: R2, Andarax; Verde: R3, Fardes; Celeste: R4, Genil; Azul: R5, Guadalfeo; Negro: área de estudio total.

Temperatura máxima (Tmax)

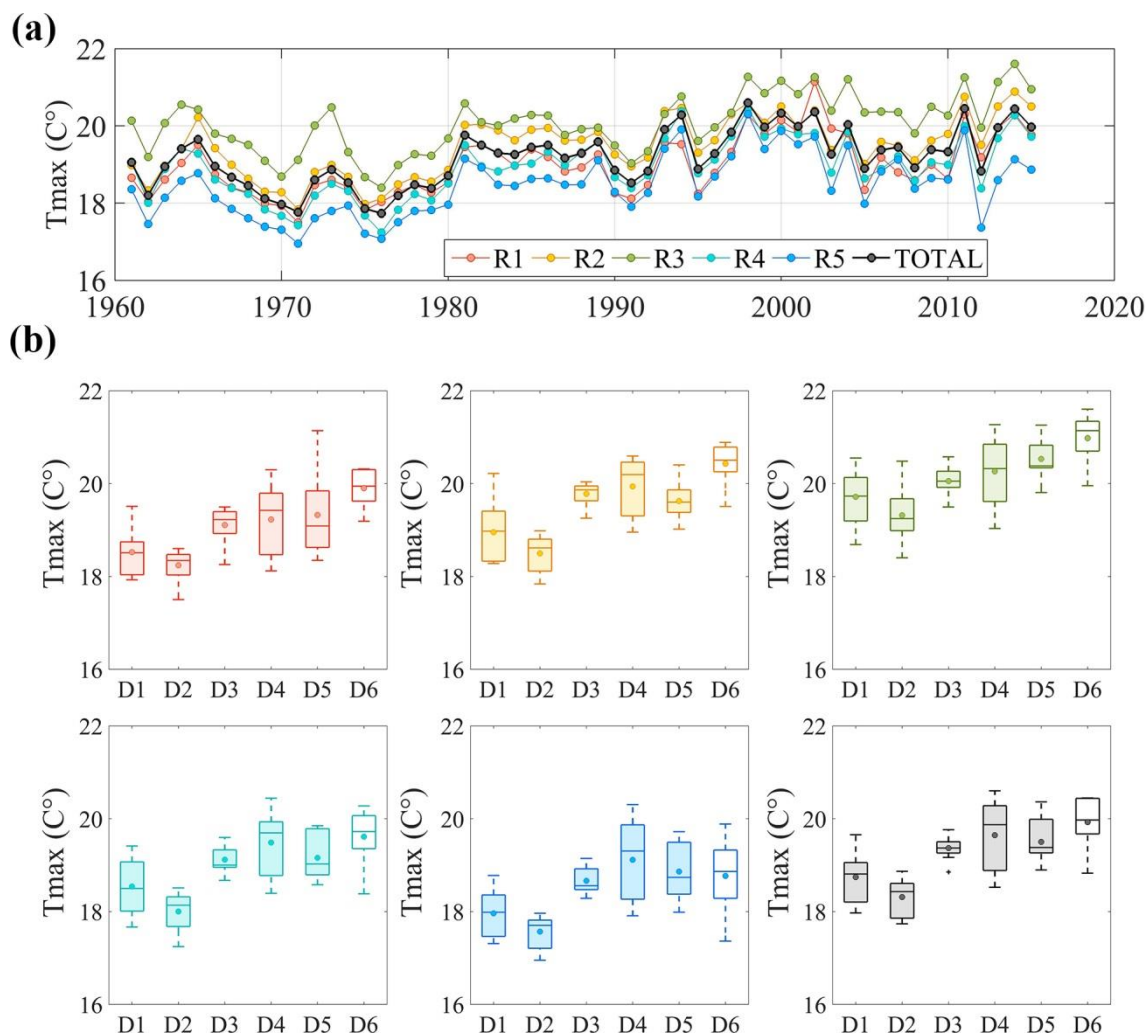


Figura A3. Evolución Tmax (a) y por décadas (b) en las cinco regiones seleccionadas en el área de estudio: Rojo: R1, Adra; Naranja: R2, Andarax; Verde: R3, Fardes; Celeste: R4, Genil; Azul: R5, Guadalfeo; Negro: área de estudio total.

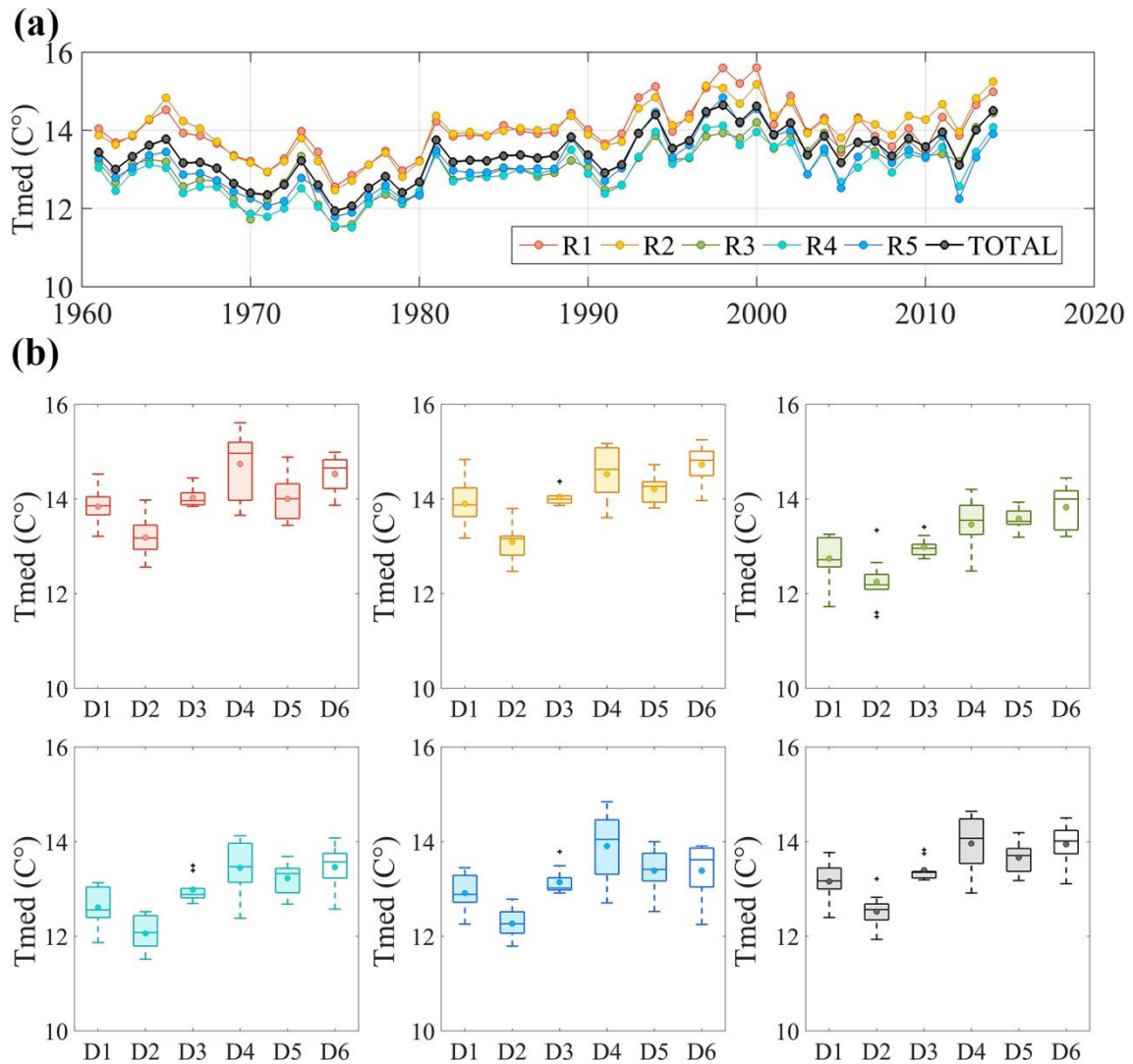
Temperatura media (Tmed)

Figura A4. Evolución Tmed (a) y por décadas (b) en las cinco regiones seleccionadas en el área de estudio: Rojo: R1, Adra; Naranja: R2, Andarax; Verde: R3, Fardes; Celeste: R4, Genil; Azul: R5, Guadalfeo; Negro: área de estudio total.

Temperatura mínima (Tmin)

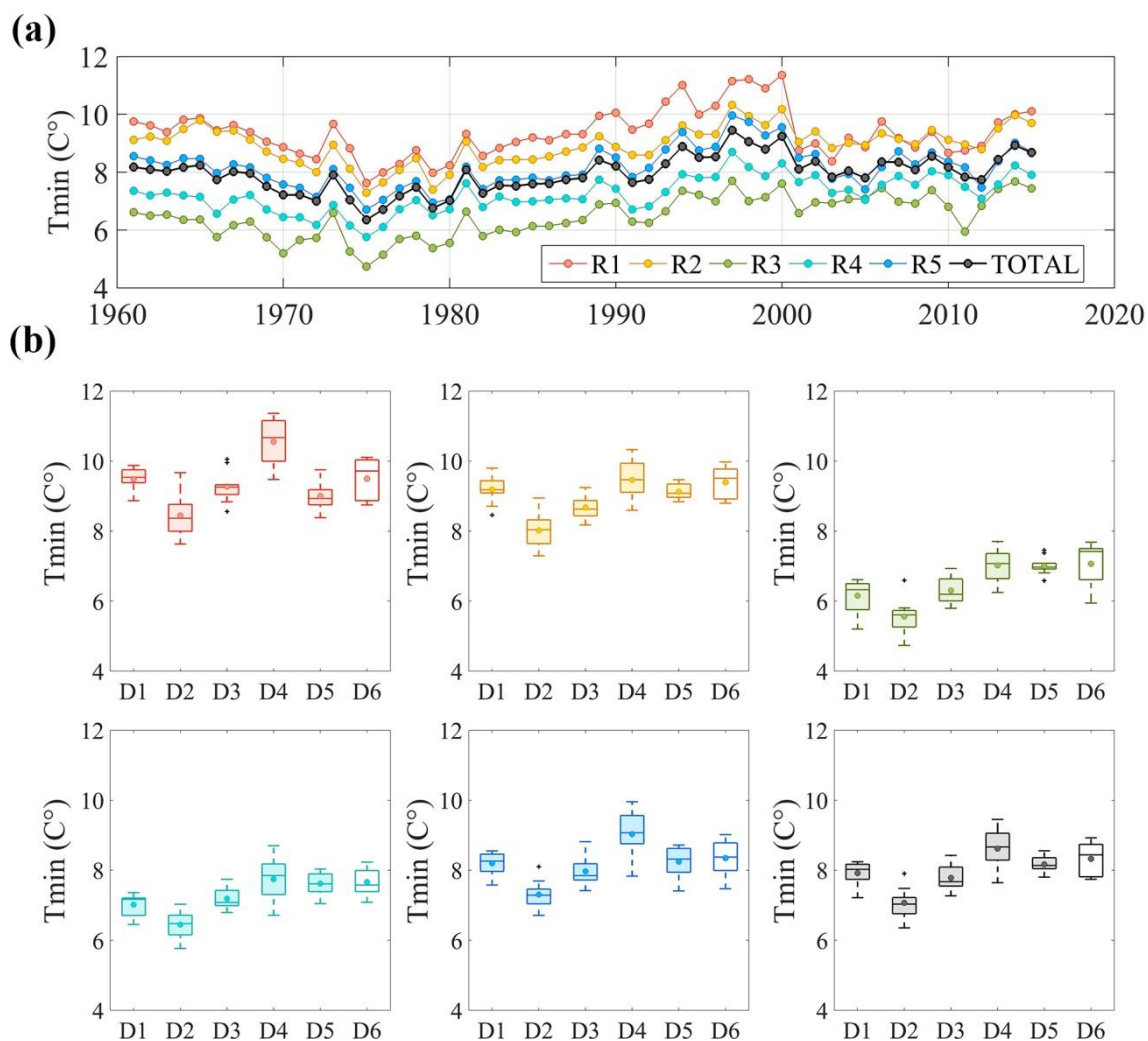


Figura A5. Evolución Tmin (a) y por décadas (b) en las cinco regiones seleccionadas en el área de estudio: Rojo: R1, Adra; Naranja: R2, Andarax; Verde: R3, Fardes; Celeste: R4, Genil; Azul: R5, Guadalfeo; Negro: área de estudio total.

Días con temperatura inferior a 0 °C (Dtmin)

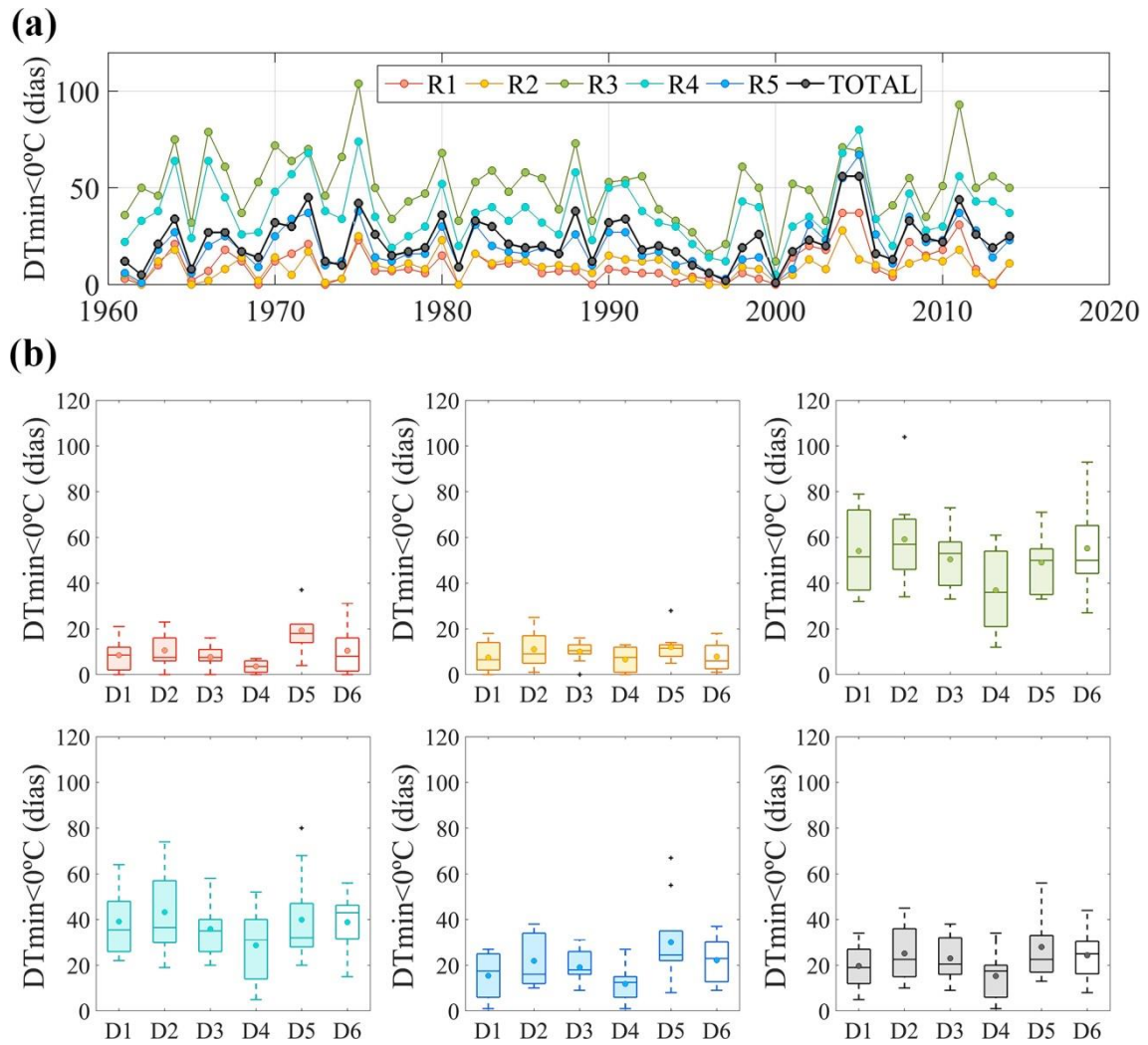


Figura A6. Evolución Dtmin (a) y por décadas (b) en las cinco regiones seleccionadas en el área de estudio: Rojo: R1, Adra; Naranja: R2, Andarax; Verde: R3, Fardes; Celeste: R4, Genil; Azul: R5, Guadalfeo; Negro: área de estudio total.

Precipitación en forma de nieve (Pn)

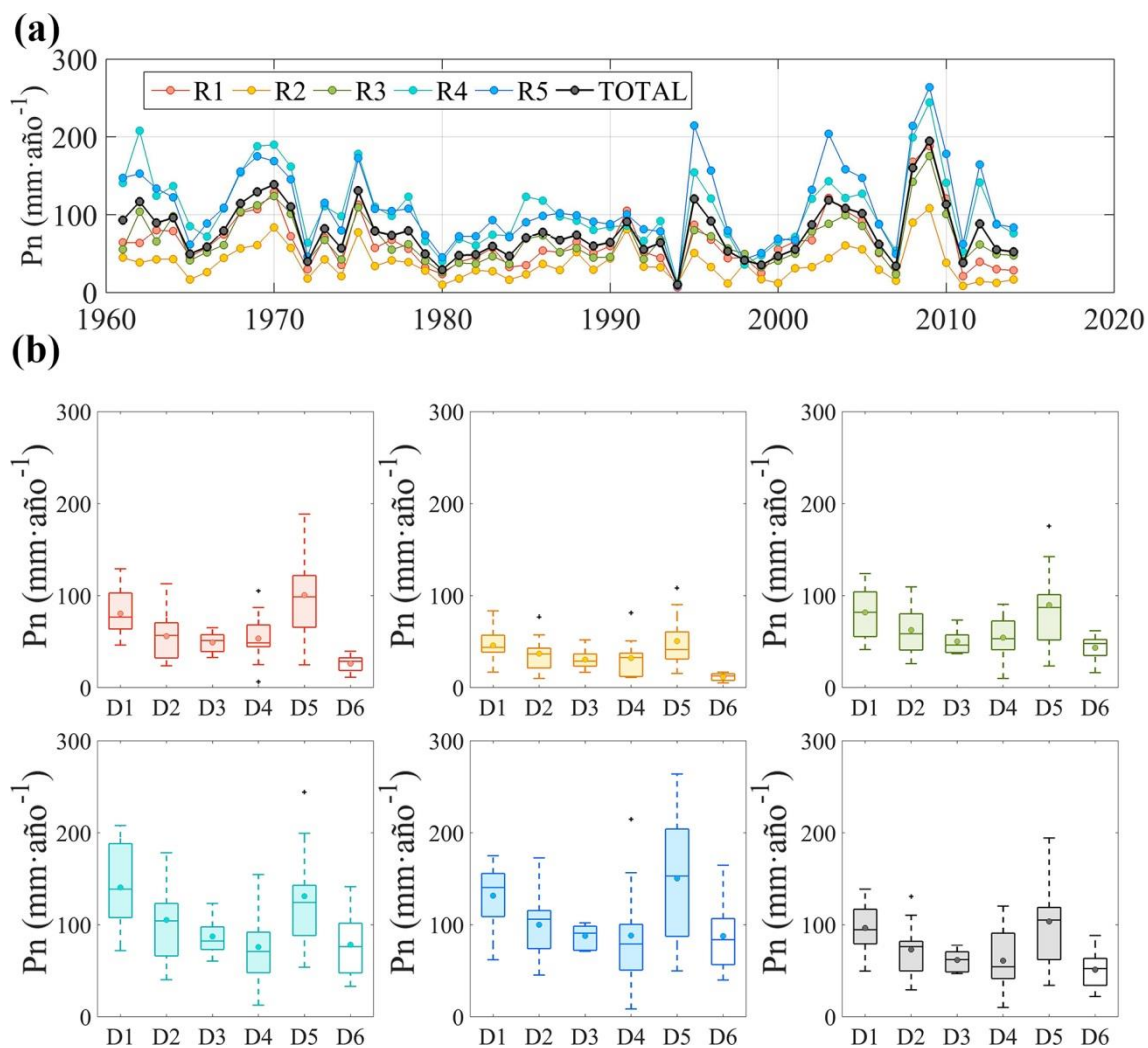


Figura A7. Evolución Pn (a) y por décadas (b) en las cinco regiones seleccionadas en el área de estudio: Rojo: R1, Adra; Naranja: R2, Andarax; Verde: R3, Fardes; Celeste: R4, Genil; Azul: R5, Guadalfeo; Negro: área de estudio total.

Días con precipitación en forma de nieve (Dpn)

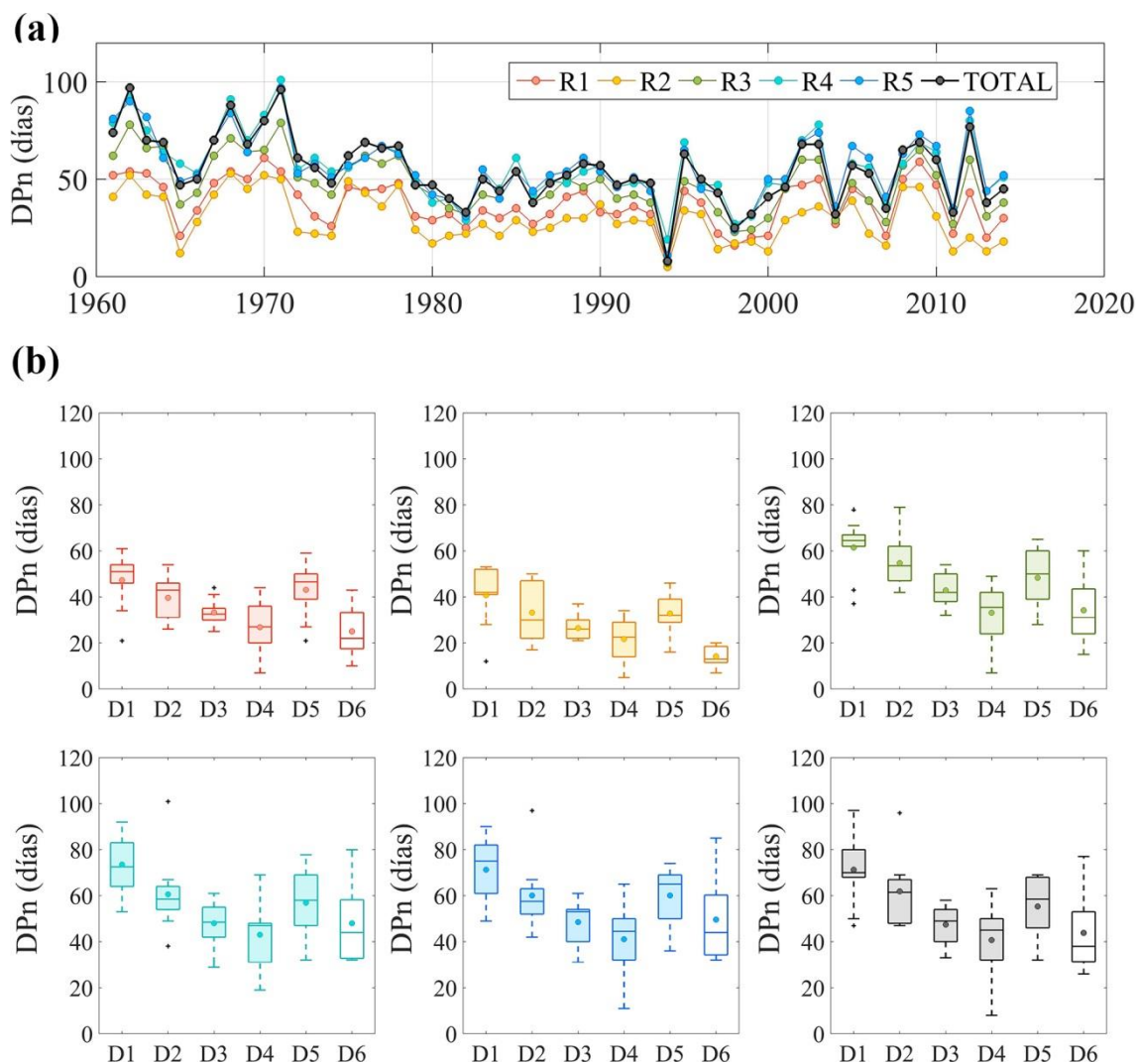


Figura A8. Evolución Dpn (a) y por décadas (b) en las cinco regiones seleccionadas en el área de estudio: Rojo: R1, Adra; Naranja: R2, Andarax; Verde: R3, Fardes; Celeste: R4, Genil; Azul: R5, Guadalfeo; Negro: área de estudio total.

Variables de la dinámica de la nieve

Evaposublimación

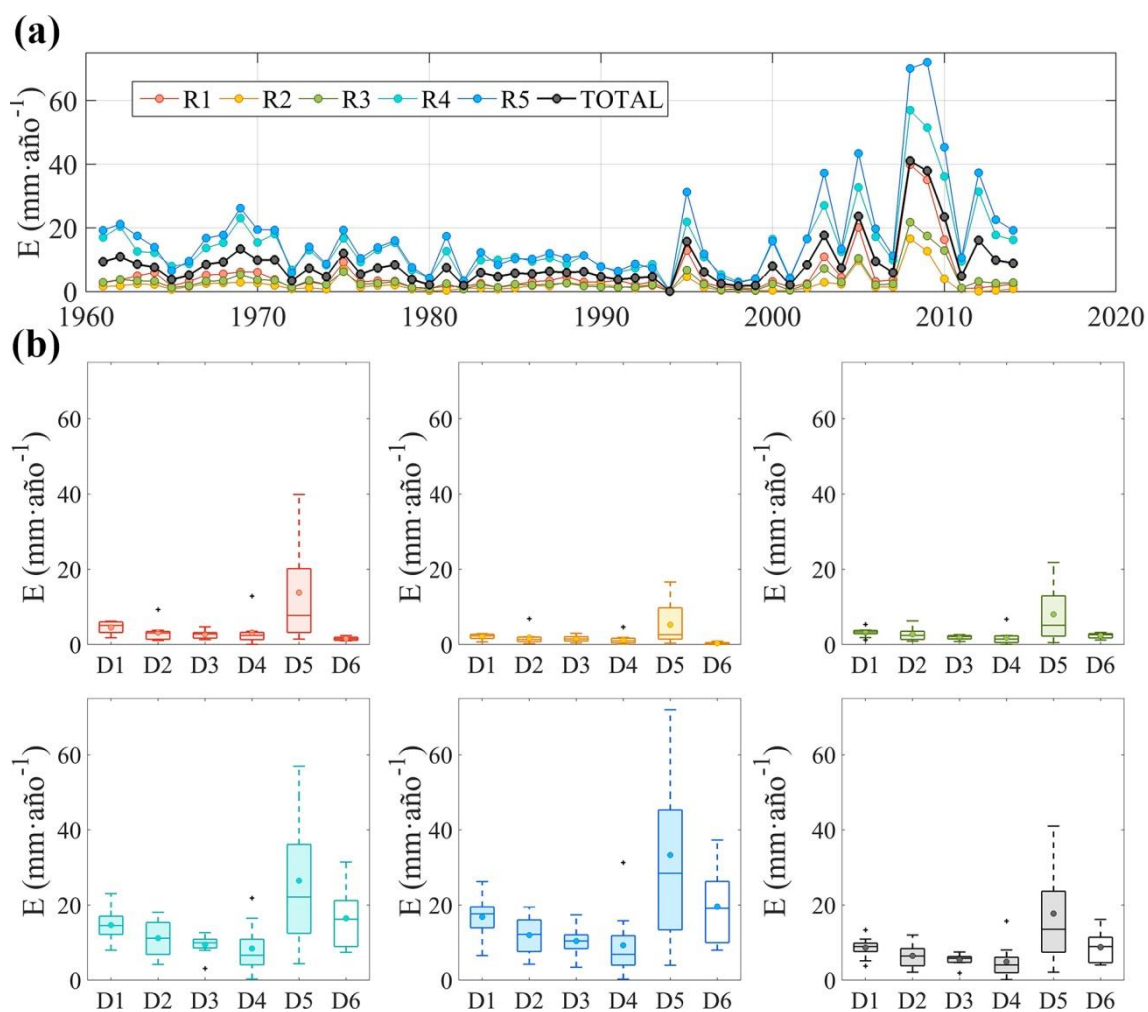


Figura A9. Evolución E (a) y por décadas (b) en las cinco regiones seleccionadas en el área de estudio: Rojo: R1, Adra; Naranja: R2, Andarax; Verde: R3, Fardes; Celeste: R4, Genil; Azul: R5, Guadalfeo; Negro: área de estudio total.

Fusión

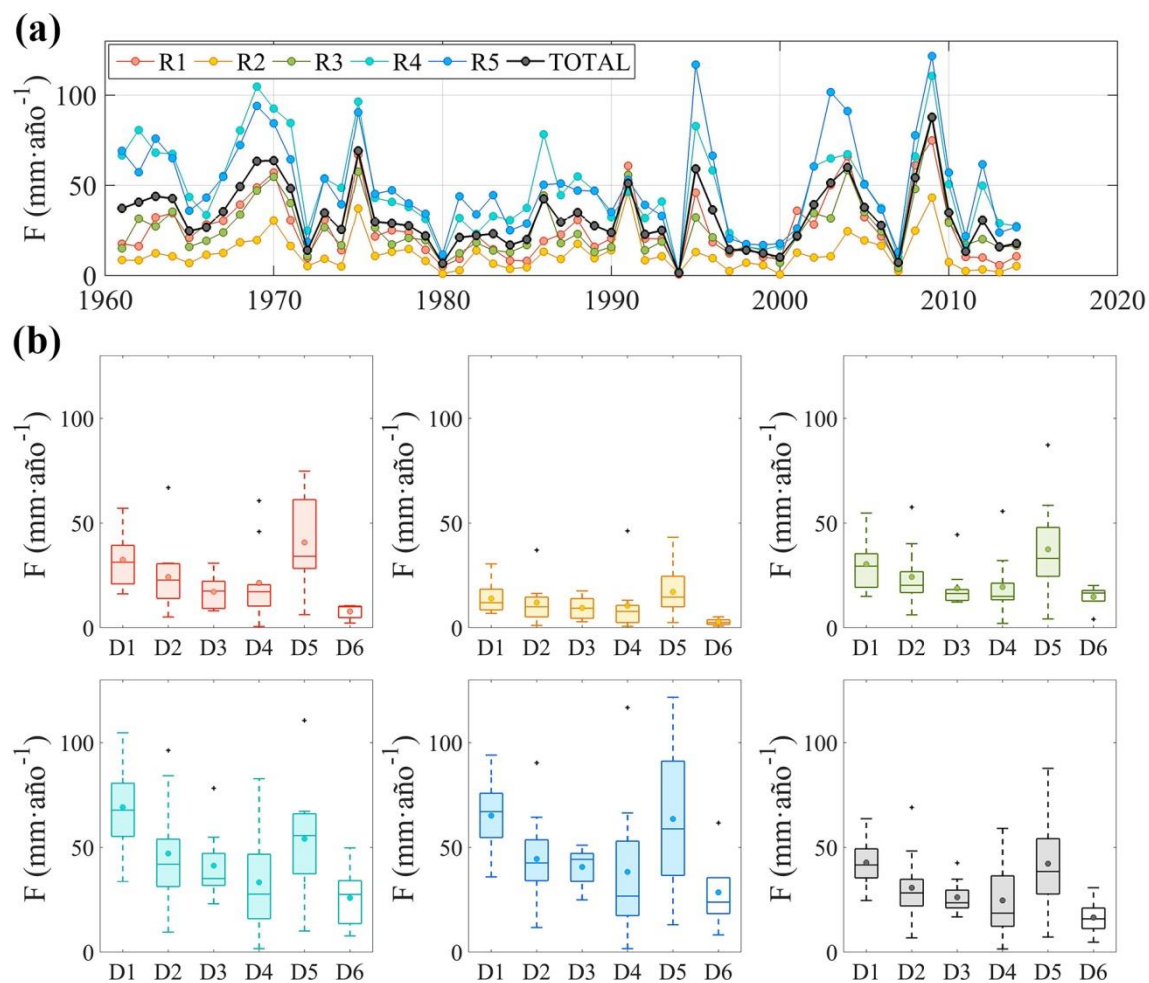


Figura A10. Evolución F (a) y por décadas (b) en las cinco regiones seleccionadas en el área de estudio: Rojo: R1, Adra; Naranja: R2, Andarax; Verde: R3, Fardes; Celeste: R4, Genil; Azul: R5, Guadalfeo; Negro: área de estudio total.

Equivalente de agua máximo (EAm_{max})

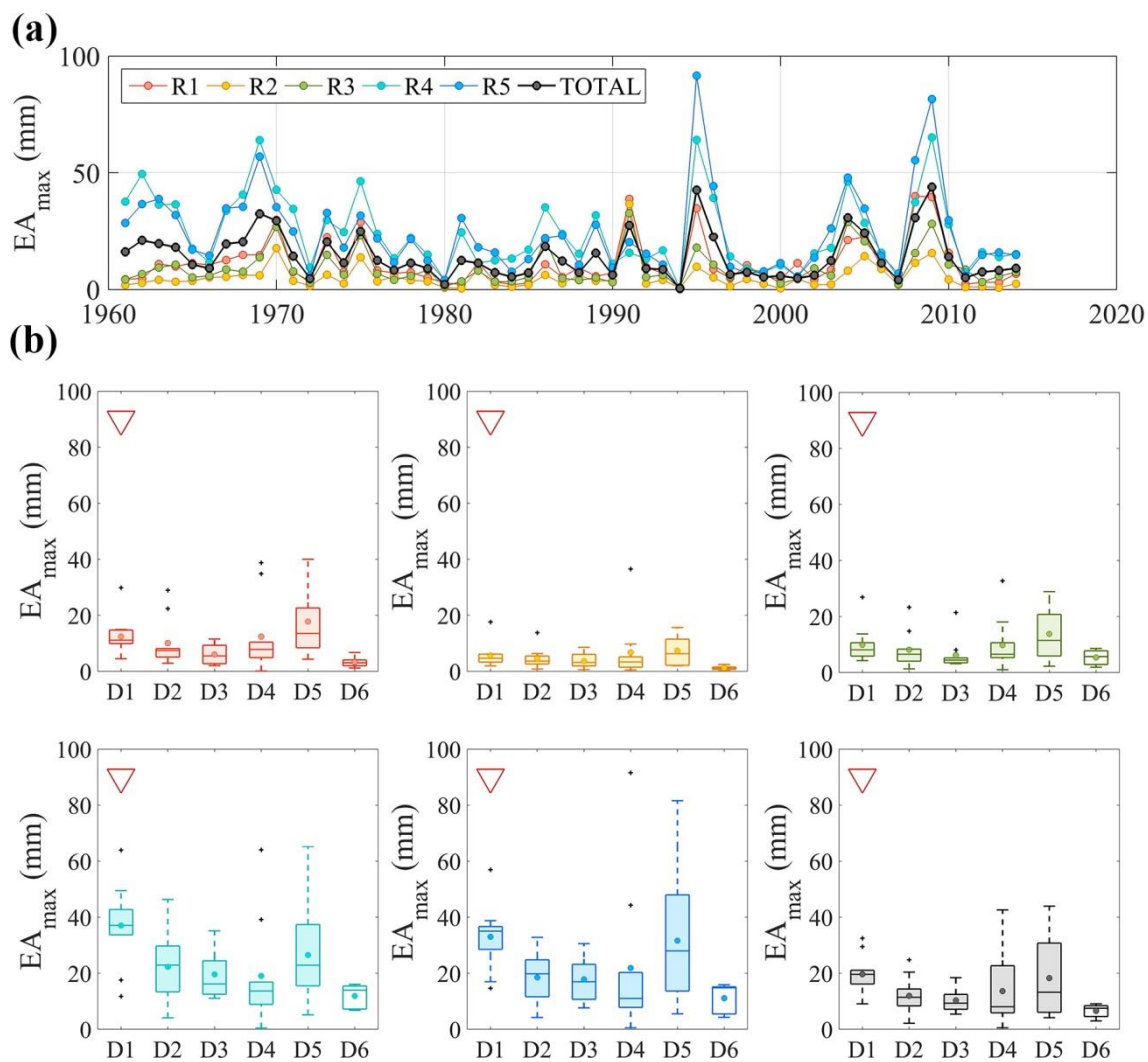


Figura A11. Evolución SWEmax(a) y por décadas (b) en las cinco regiones seleccionadas en el área de estudio: Rojo: R1, Adra; Naranja: R2, Andarax; Verde: R3, Fardes; Celeste: R4, Genil; Azul: R5, Guadalfeo; Negro: área de estudio total.

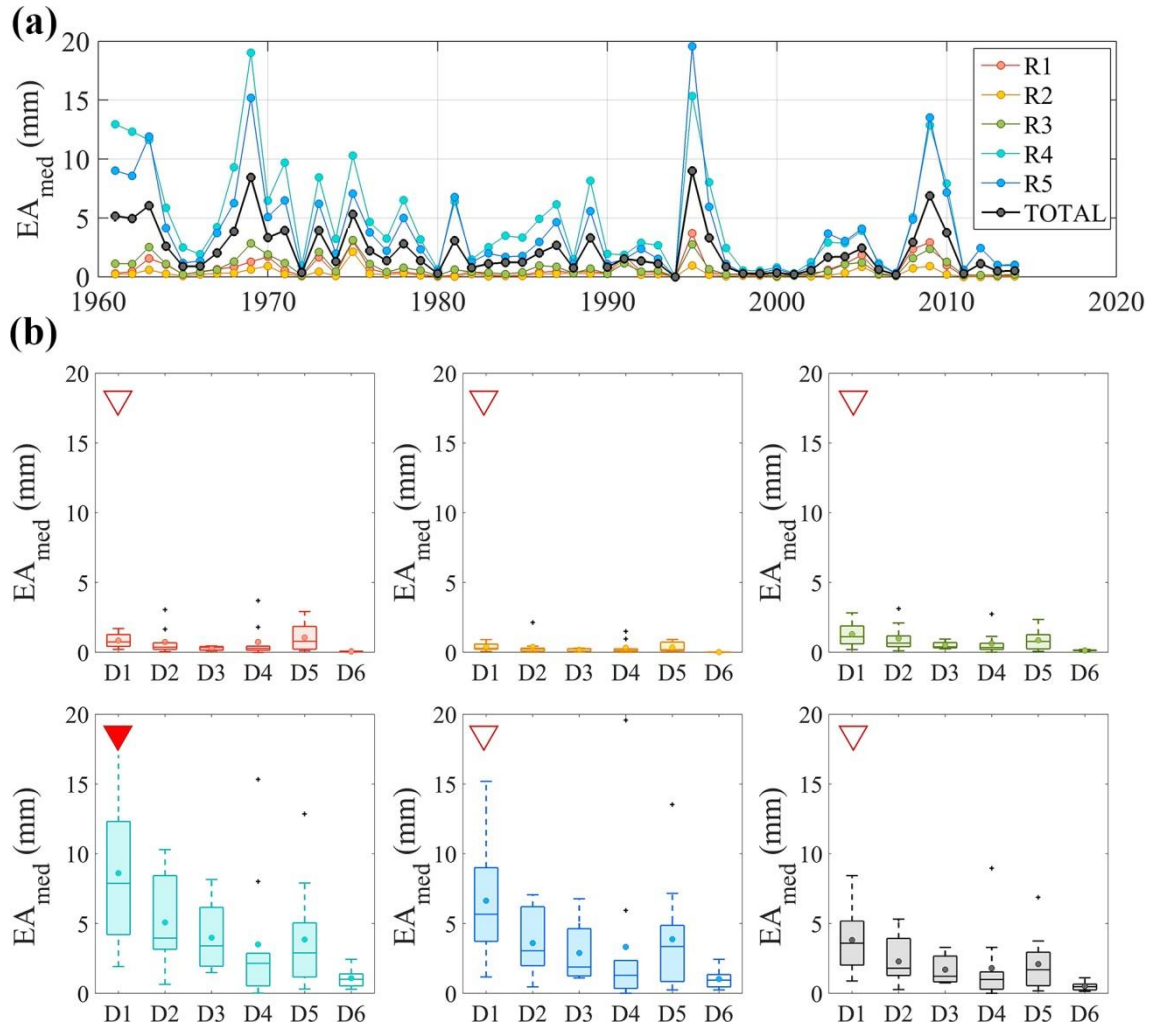
Equivalente de agua máximo (EAm_{ed})

Figura A12. Evolución SWEm_{ed} (a) y por décadas (b) en las cinco regiones seleccionadas en el área de estudio: Rojo: R1, Adra; Naranja: R2, Andarax; Verde: R3, Fardes; Celeste: R4, Genil; Azul: R5, Guadalfeo; Negro: área de estudio total.

Días con nieve en superficie (DíasNS)

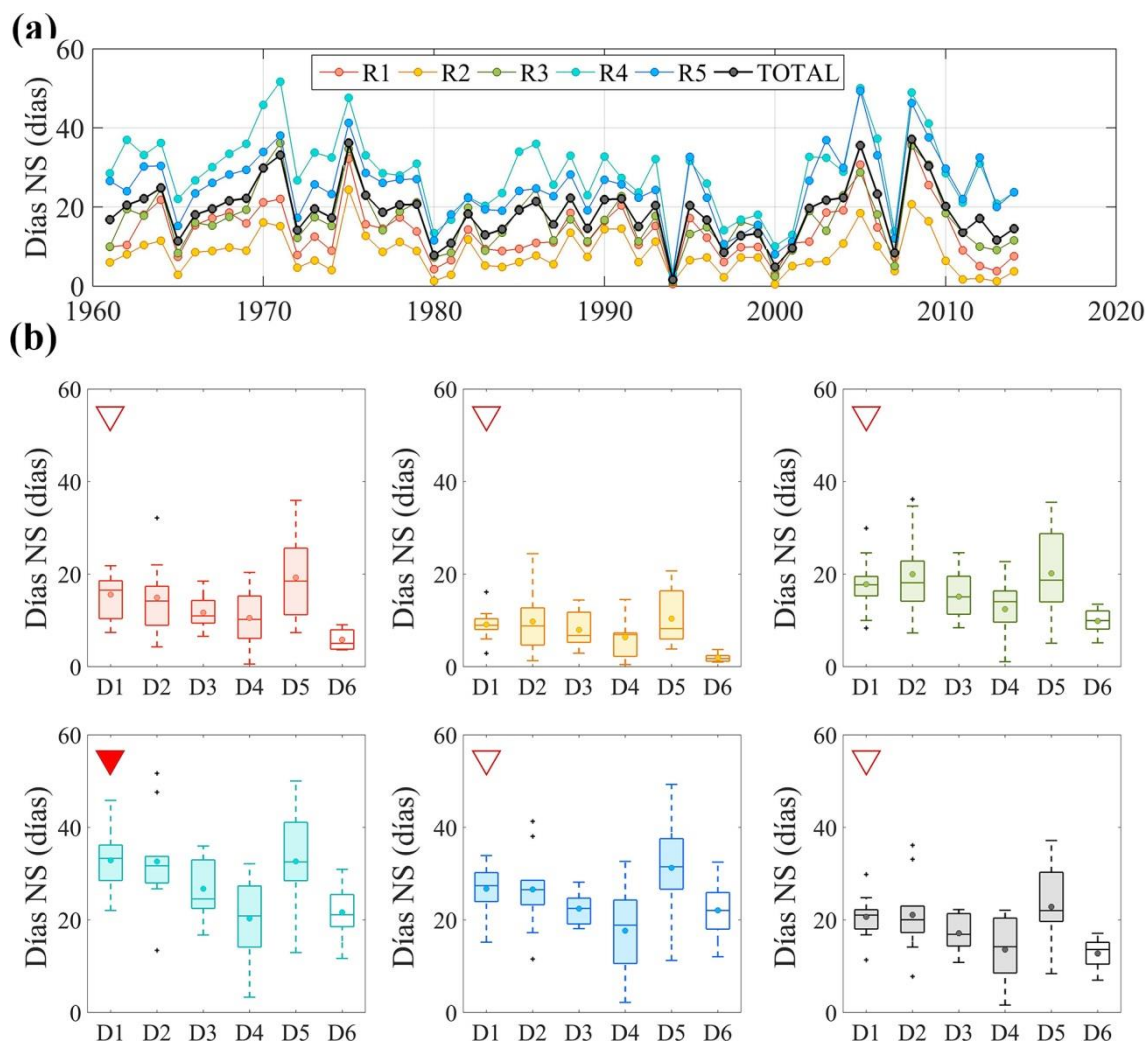


Figura A13. Evolución DíasNS (a) y por décadas (b) en las cinco regiones seleccionadas en el área de estudio: Rojo: R1, Adra; Naranja: R2, Andarax; Verde: R3, Fardes; Celeste: R4, Genil; Azul: R5, Guadalfeo; Negro: área de estudio total.

Superficie cubierta de nieve medio (SCN)

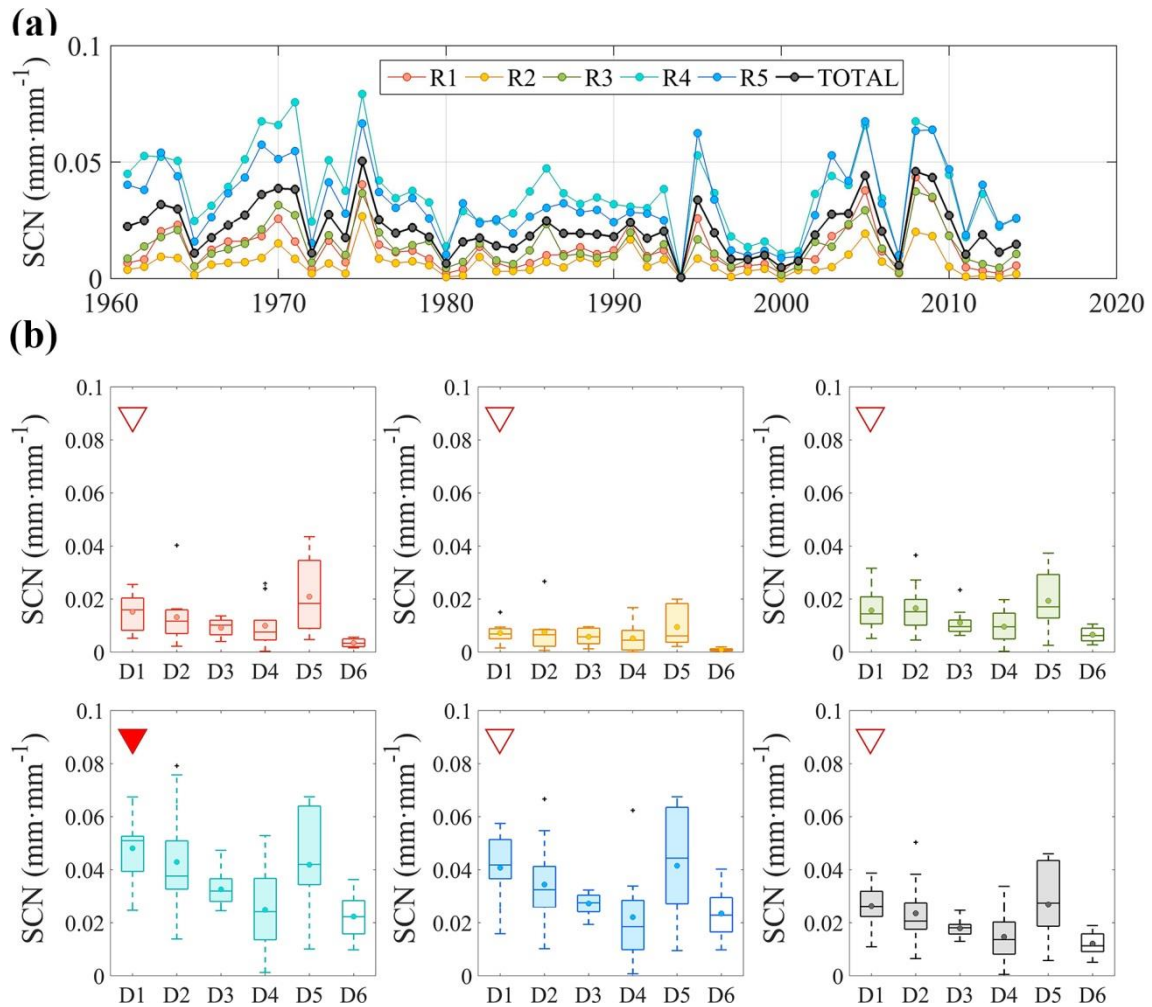


Figura A14. Evolución SCN (a) y por décadas (b) en las cinco regiones seleccionadas en el área de estudio: Rojo: R1, Adra; Naranja: R2, Andarax; Verde: R3, Fardes; Celeste: R4, Genil; Azul: R5, Guadalfeo; Negro: área de estudio total.

Porcentaje de fusión en relación a la suma de los flujos de nieve (F^*)

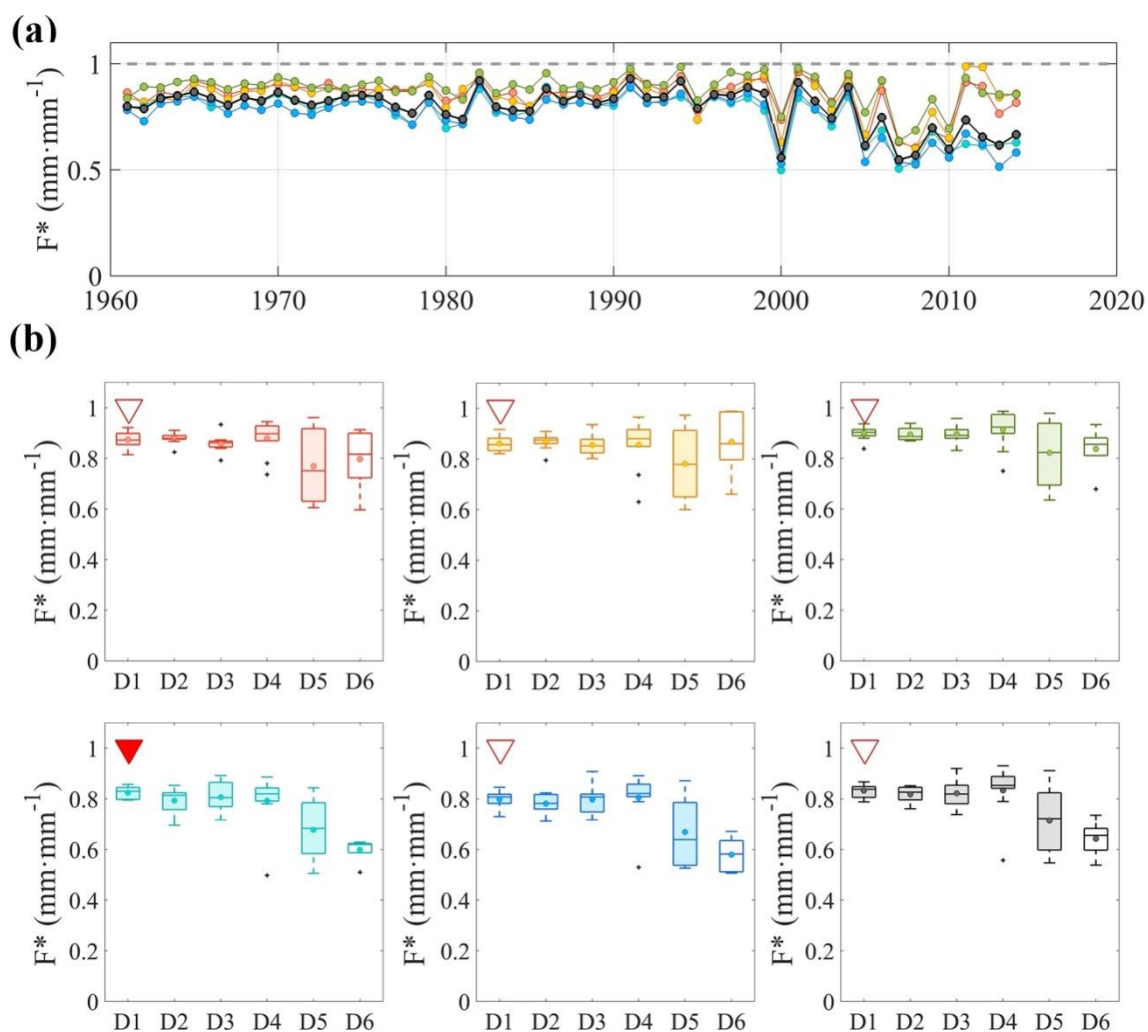


Figura A1. Evolución F^* (a) y por décadas (b) en las cinco regiones seleccionadas en el área de estudio: Rojo: R1, Adra; Naranja: R2, Andarax; Verde: R3, Fardes; Celeste: R4, Genil; Azul: R5, Guadalfeo; Negro: área de estudio total.

Appendix C: Análisis a escala anual por meses en el área del Parque Nacional y Natural de Sierra Nevada

Septiembre

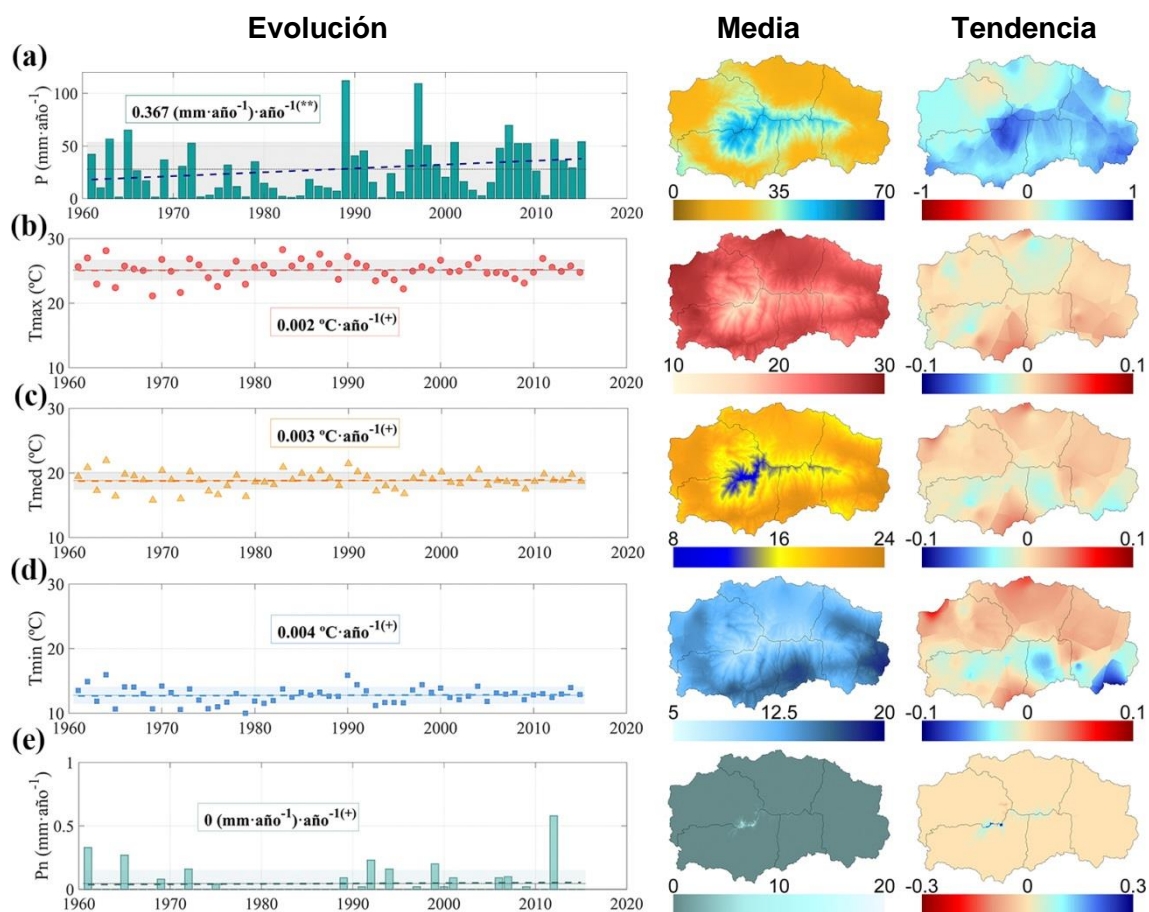


Figura C1. Evolución del mes de septiembre de las variables (a) Precipitación acumulada mensual; (b) Temperatura máxima media mensual; (c) Temperatura media mensual; (d) Temperatura mínima media mensual; (e) Precipitación en forma de nieve mensual. Cada variable se le asocia un mapa de valores medios y uno de tendencias para todo el periodo analizado.

Octubre

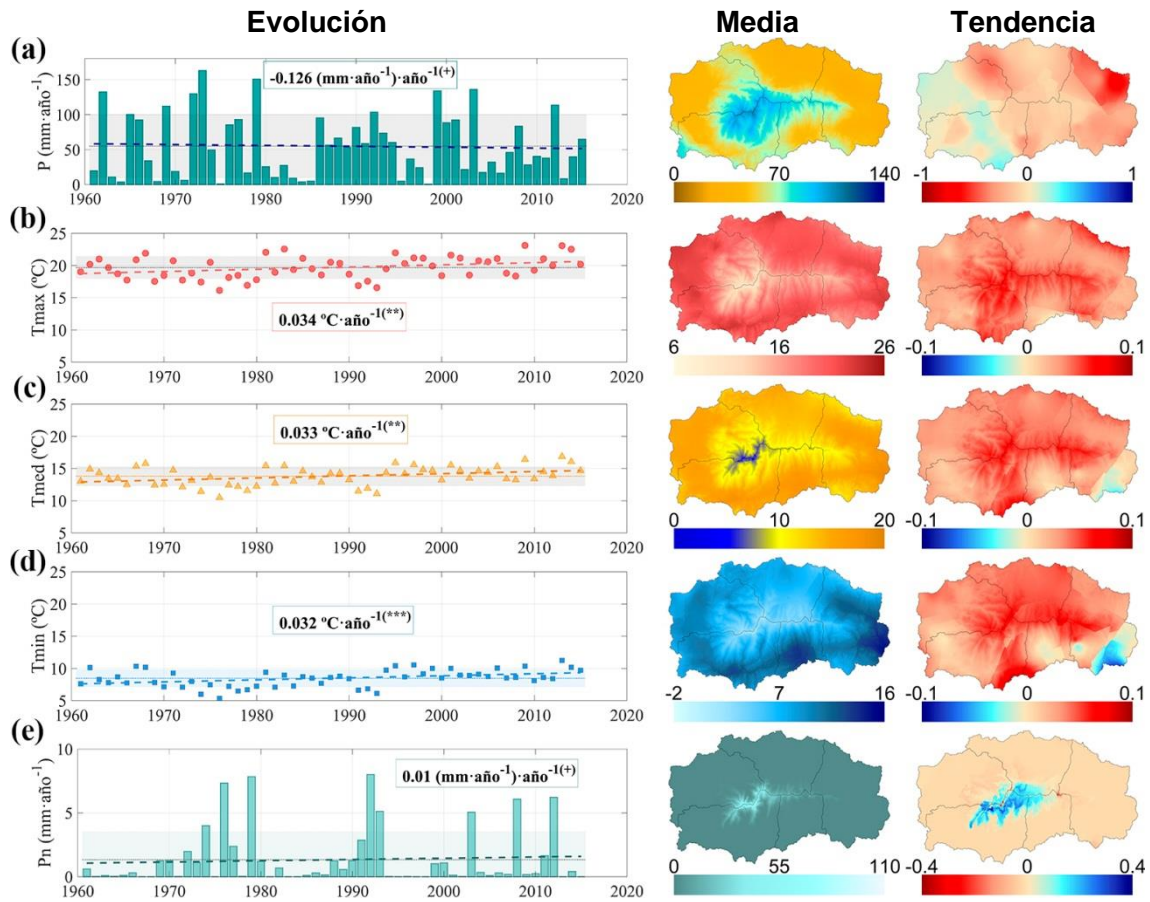


Figura C2. Evolución del mes de octubre de las variables (a) Precipitación acumulada mensual; (b) Temperatura máxima media mensual; (c) Temperatura media mensual; (d) Temperatura mínima media mensual; (e) Precipitación en forma de nieve mensual. Cada variable se le asocia un mapa de valores medios y uno de tendencias para todo el periodo analizado.

Noviembre

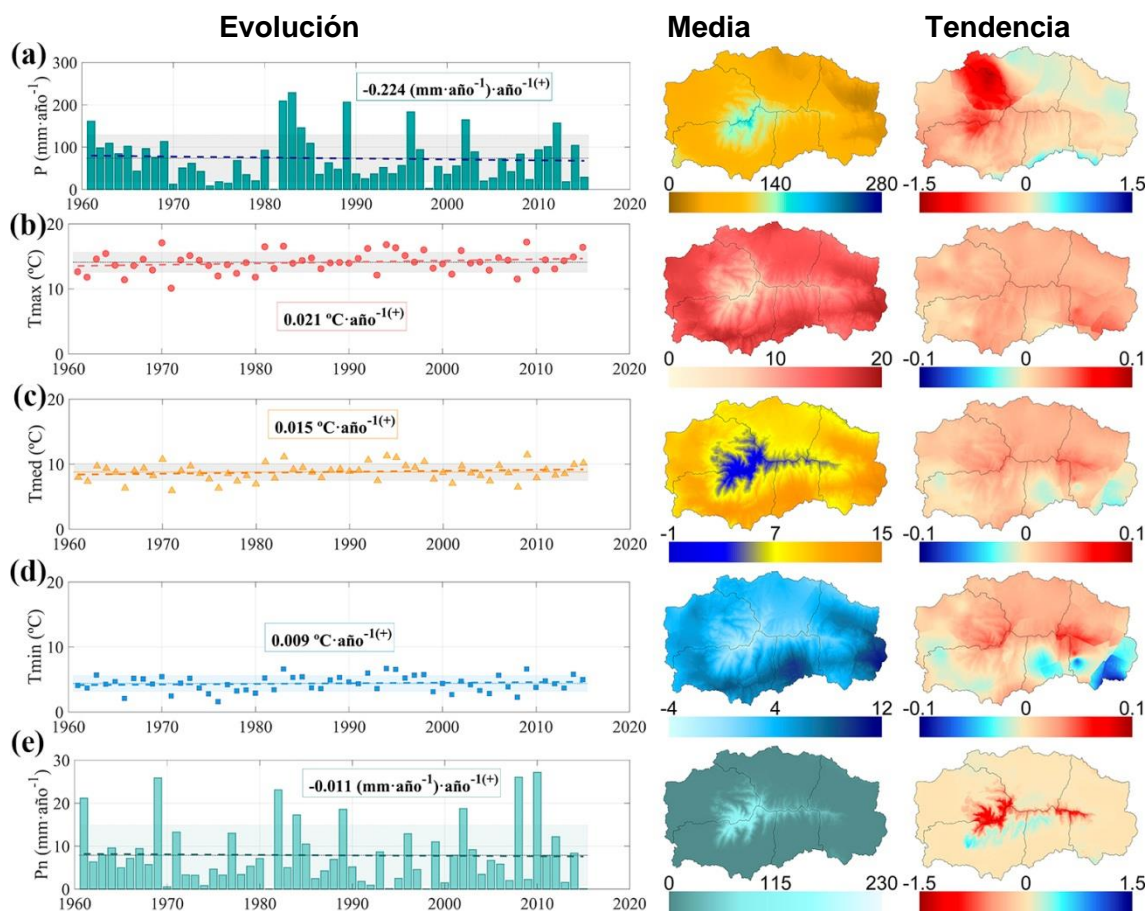


Figura C3. Evolución del mes de noviembre de las variables (a) Precipitación acumulada mensual (b) Temperatura máxima media mensual; (c) Temperatura media mensual; (d) Temperatura mínima media mensual; (e) Precipitación en forma de nieve mensual. Cada variable se le asocia un mapa de valores medios y uno de tendencias para todo el periodo analizado.

Diciembre

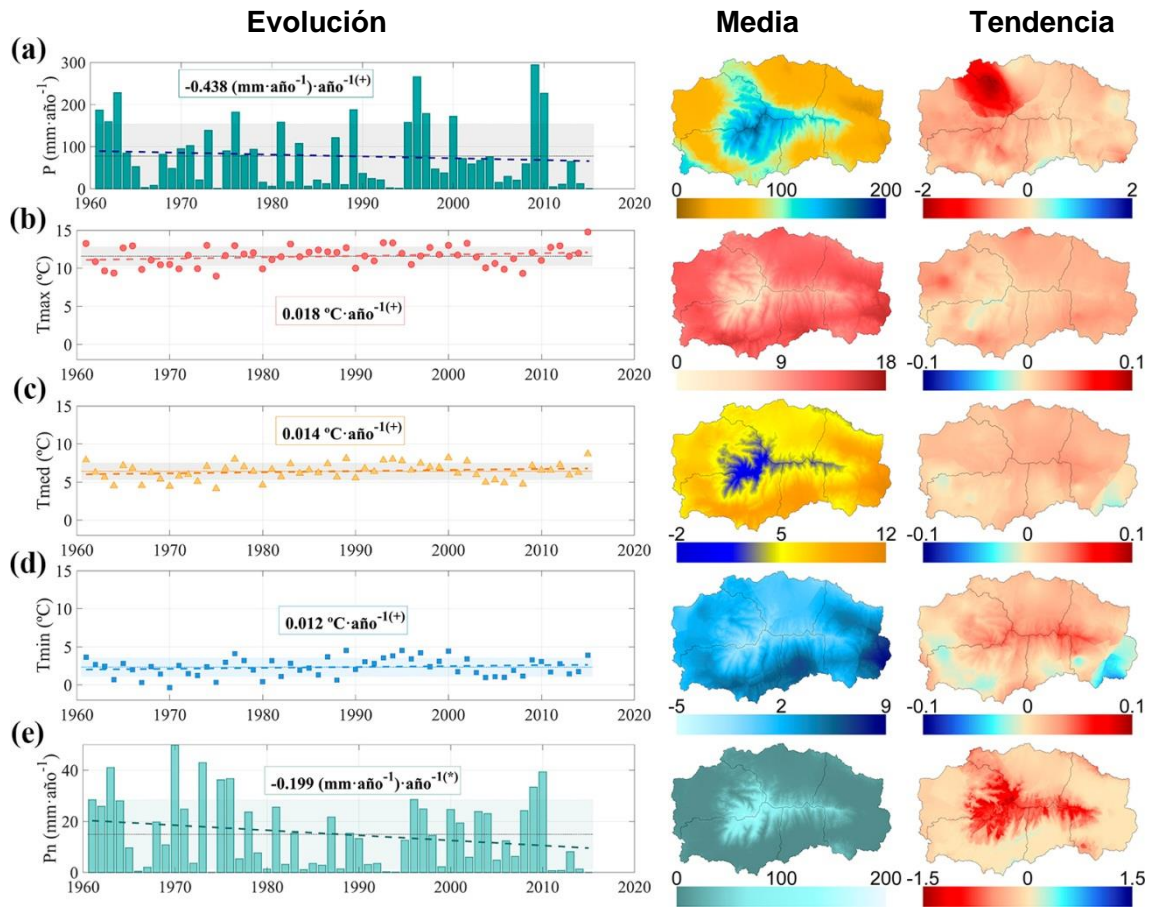


Figura C4. Evolución del mes de diciembre de las variables (a) Precipitación acumulada mensual (b) Temperatura máxima media mensual; (c) Temperatura media mensual; (d) Temperatura mínima media mensual; (e) Precipitación en forma de nieve mensual. Cada variable se le asocia un mapa de valores medios y uno de tendencias para todo el periodo analizado.

Enero

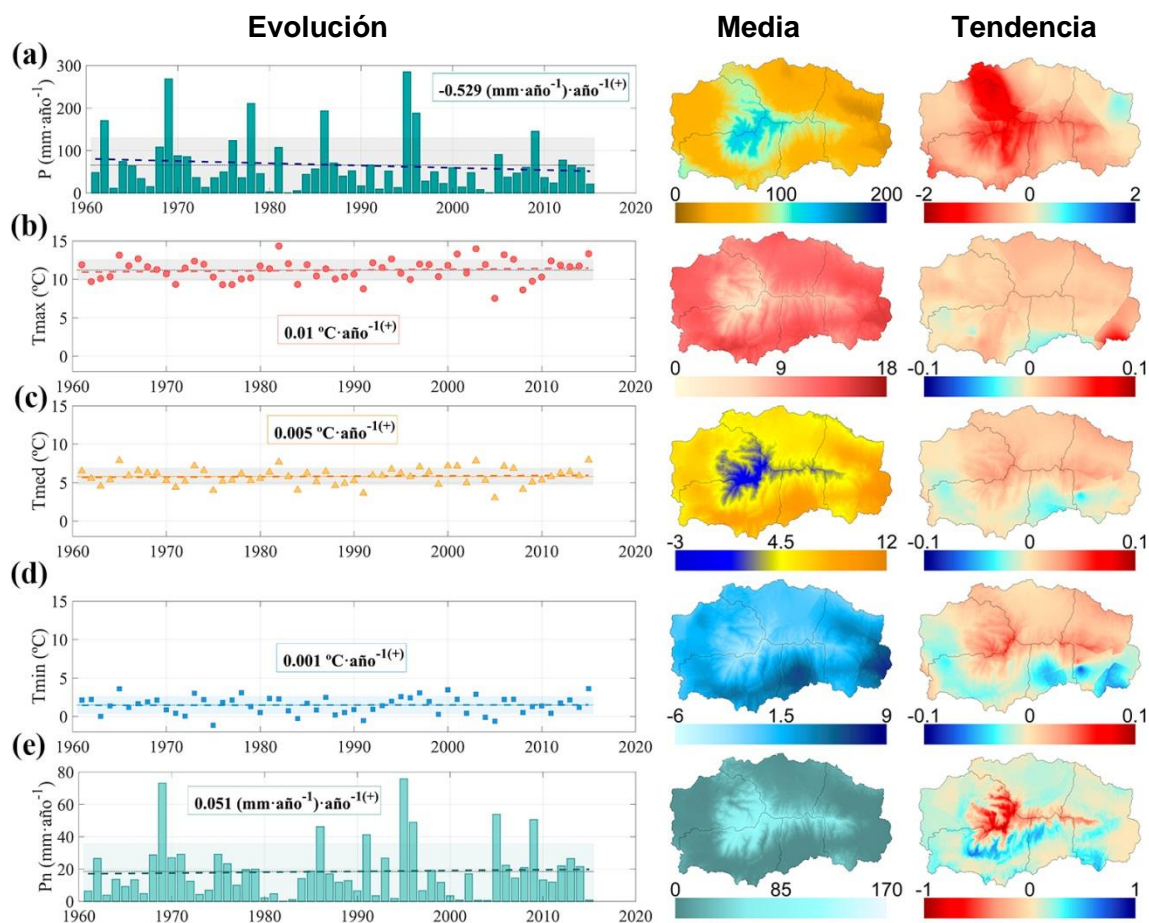


Figura C5. Evolución del mes de enero de las variables (a) Precipitación acumulada mensual (b) Temperatura máxima media mensual; (c) Temperatura media mensual; (d) Temperatura mínima media mensual; (e) Precipitación en forma de nieve mensual. Cada variable se le asocia un mapa de valores medios y uno de tendencias para todo el periodo analizado.

Febrero

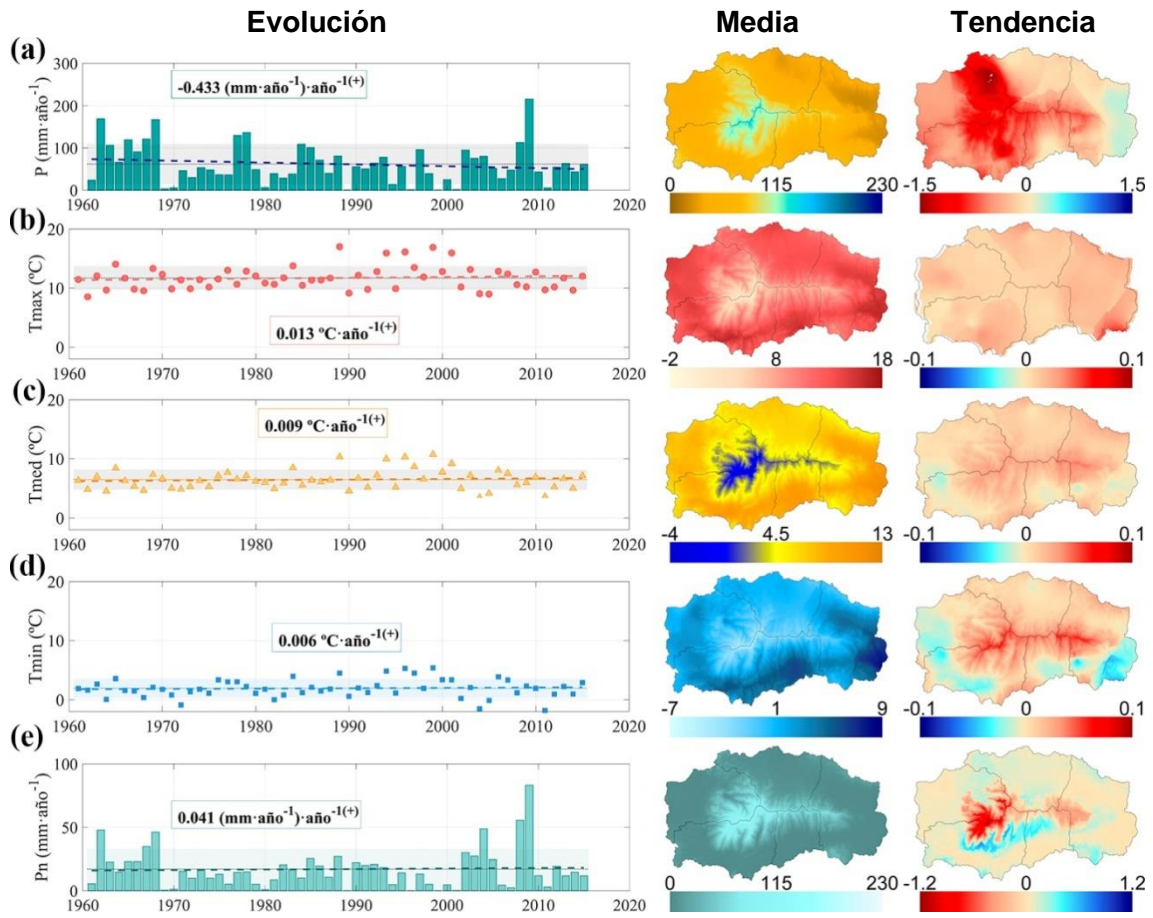


Figura C6. Evolución del mes de febrero de las variables (a) Precipitación acumulada mensual; (b) Temperatura máxima media mensual; (c) Temperatura media mensual; (d) Temperatura mínima media mensual; (e) Precipitación en forma de nieve mensual. Cada variable se le asocia un mapa de valores medios y uno de tendencias para todo el periodo analizado.

Marzo

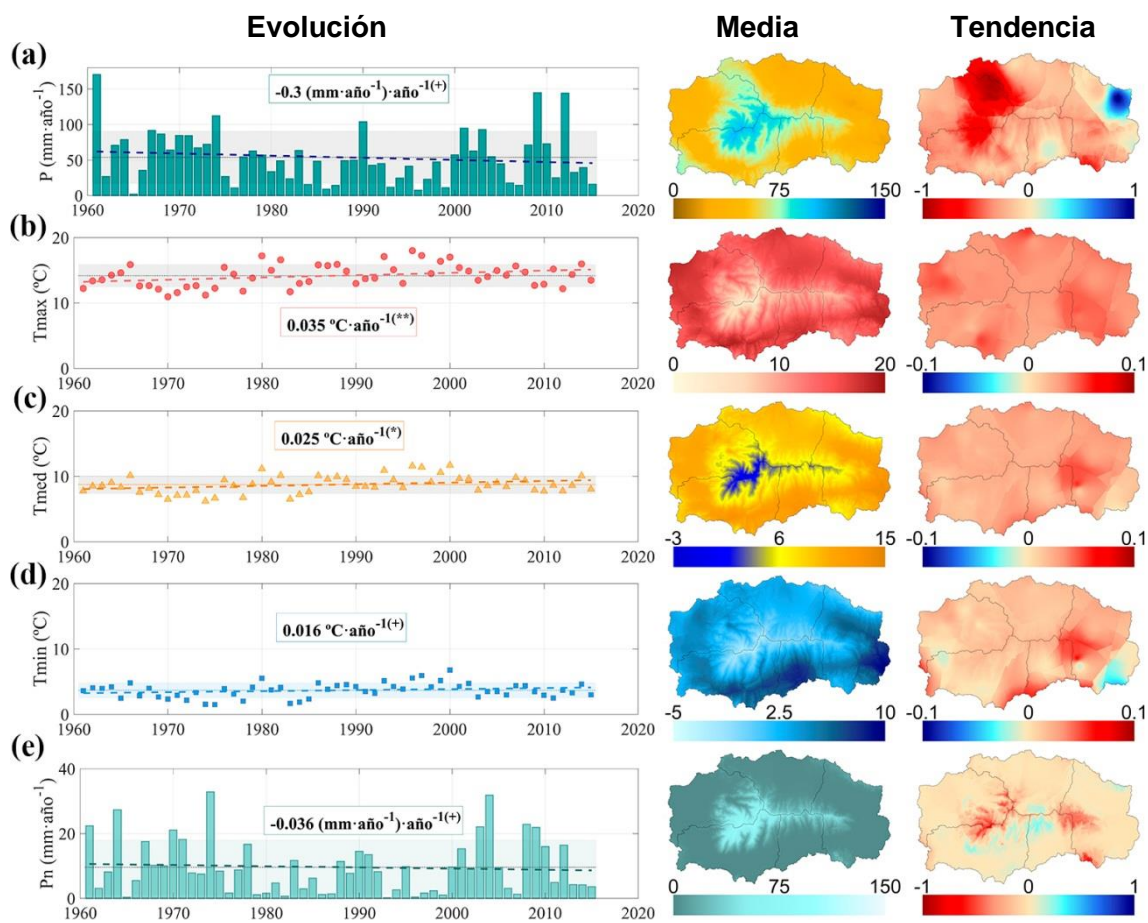


Figura C7. Evolución del mes de marzo de las variables (a) Precipitación acumulada mensual; (b) Temperatura máxima media mensual; (c) Temperatura media mensual; (d) Temperatura mínima media mensual; (e) Precipitación en forma de nieve mensual. Cada variable se le asocia un mapa de valores medios y uno de tendencias para todo el periodo analizado.

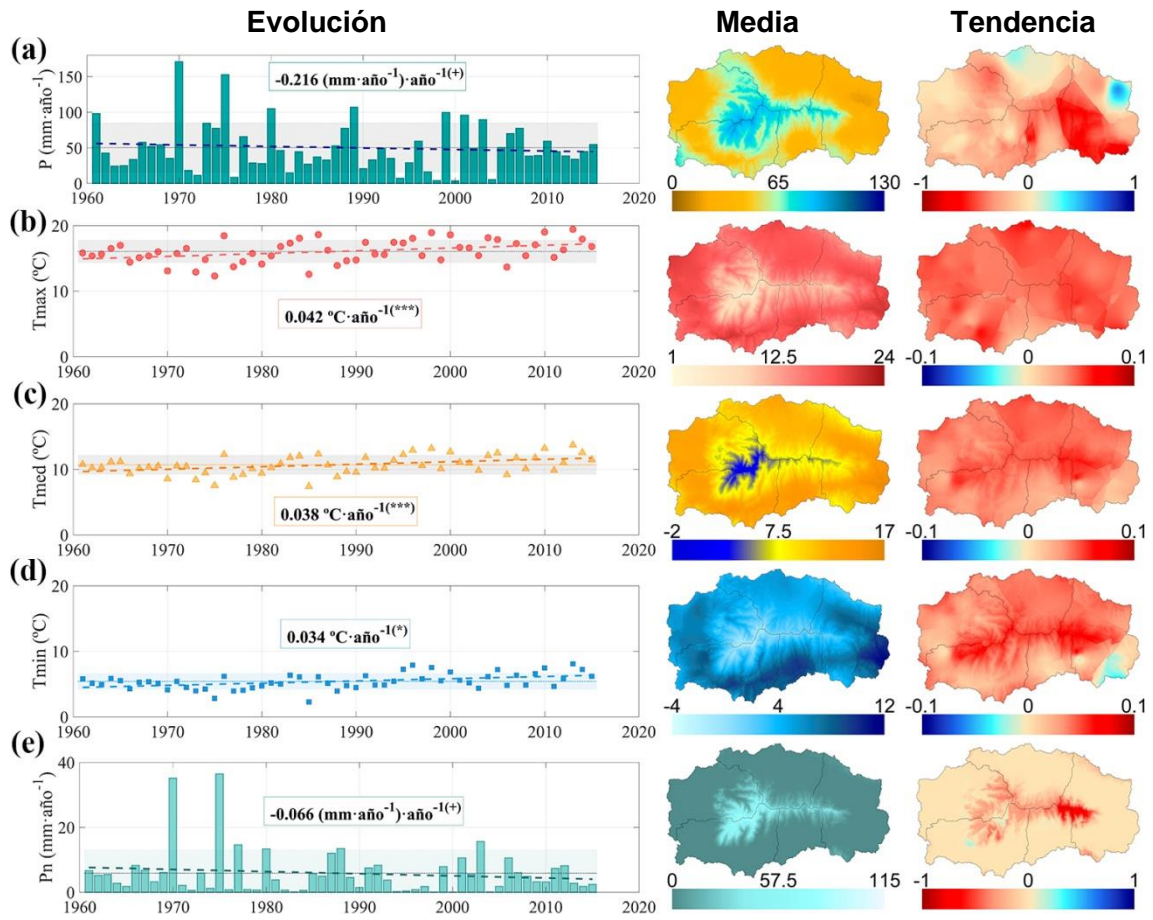
Abril

Figura C8. Evolución del mes de abril de las variables (a) Precipitación acumulada mensual; (b) Temperatura máxima media mensual; (c) Temperatura media mensual; (d) Temperatura mínima media mensual; (e) Precipitación en forma de nieve mensual. Cada variable se le asocia un mapa de valores medios y uno de tendencias para todo el periodo analizado.

Mayo

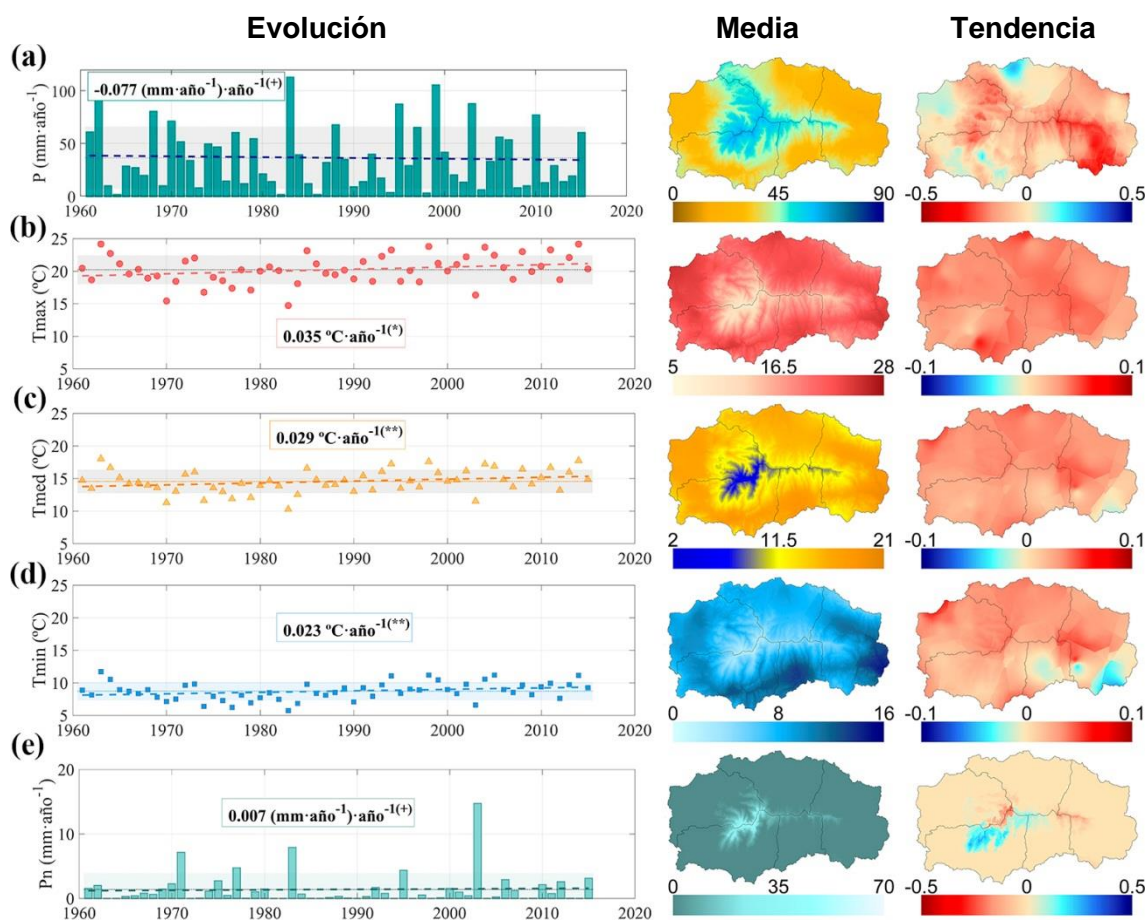


Figura C9. Evolución del mes de mayo de las variables (a) Precipitación acumulada mensual; (b) Temperatura máxima media mensual; (c) Temperatura media mensual; (d) Temperatura mínima media mensual; (e) Precipitación en forma de nieve mensual. Cada variable se le asocia un mapa de valores medios y uno de tendencias para todo el periodo analizado.

Junio

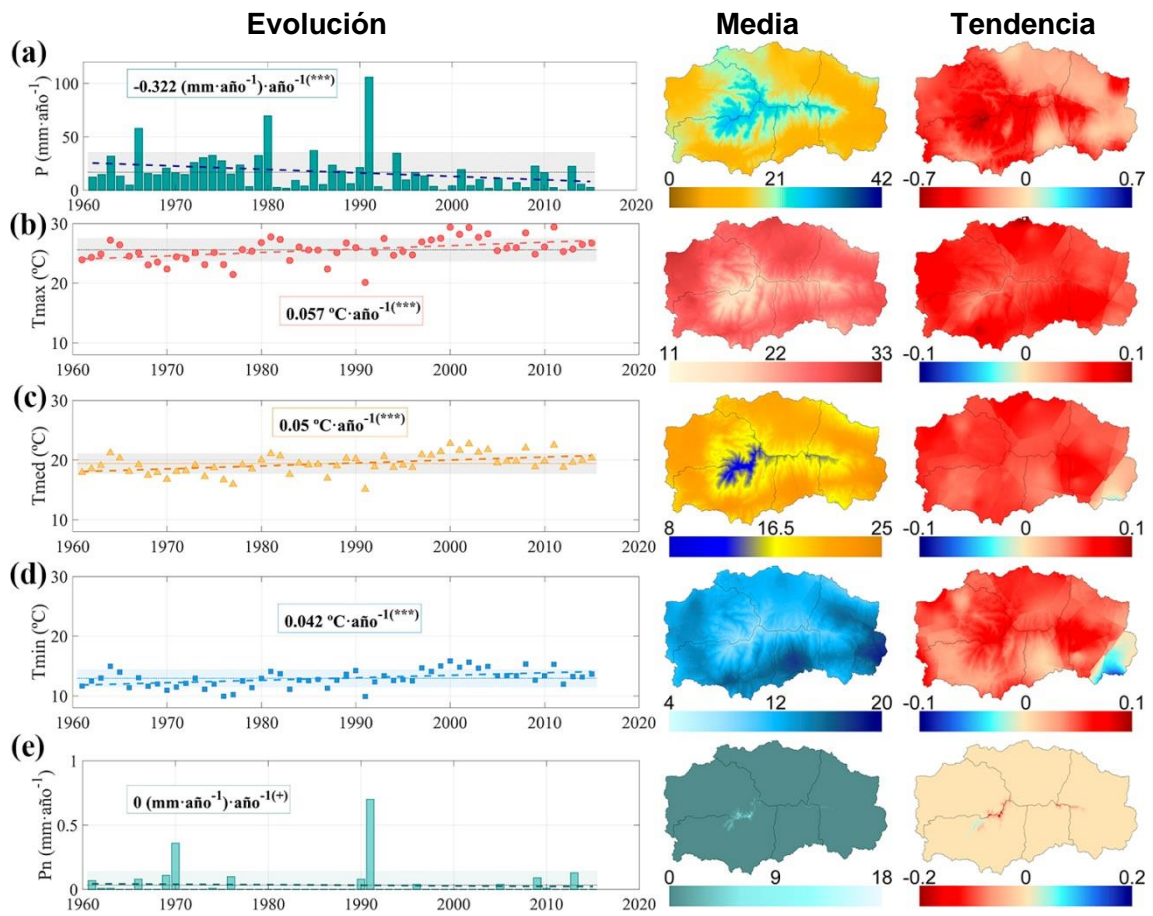


Figura C10. Evolución del mes de junio de las variables (a) Precipitación acumulada mensual; (b) Temperatura máxima media mensual; (c) Temperatura media mensual; (d) Temperatura mínima media mensual; (e) Precipitación en forma de nieve mensual. Cada variable se le asocia un mapa de valores medios y uno de tendencias para todo el periodo analizado.

Julio

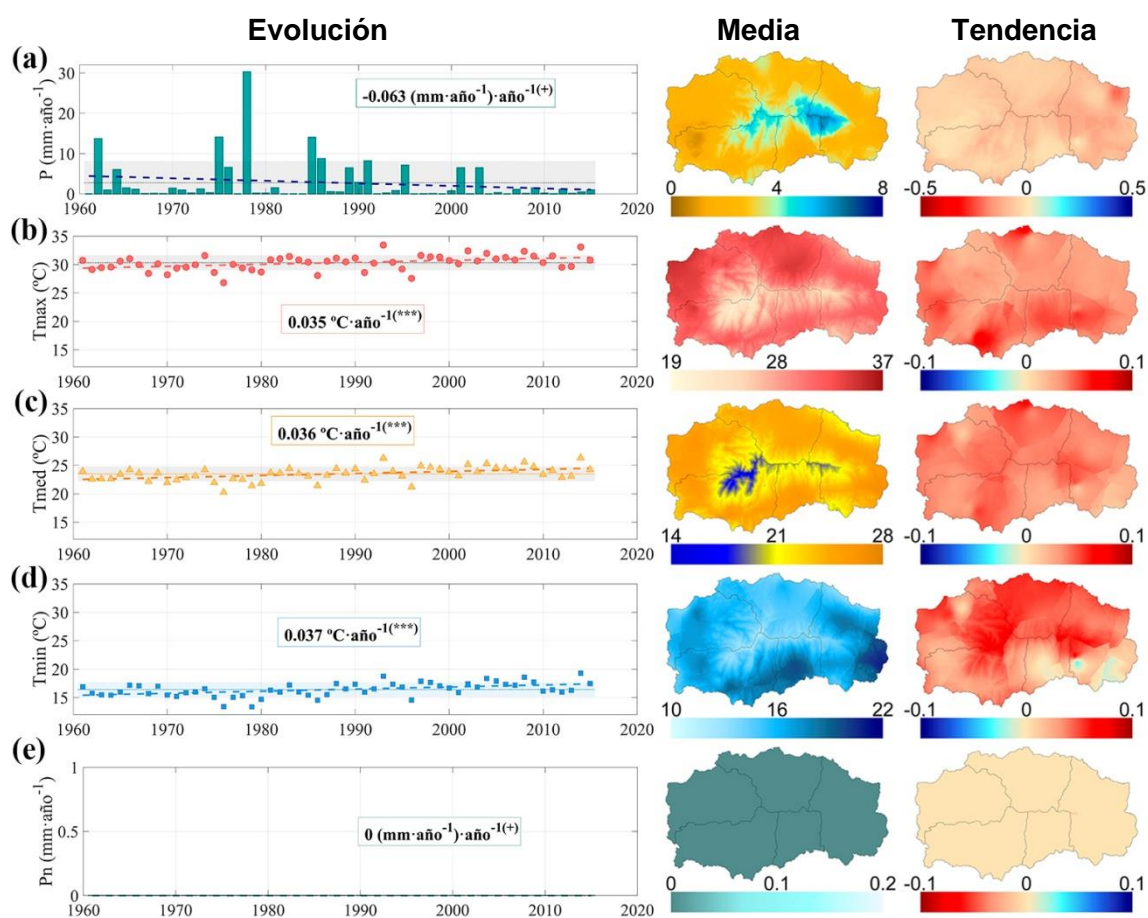


Figura C11. Evolución del mes de julio de las variables (a) Precipitación acumulada mensual; (b) Temperatura máxima media mensual; (c) Temperatura media mensual; (d) Temperatura mínima media mensual; (e) Precipitación en forma de nieve mensual. Cada variable se le asocia un mapa de valores medios y uno de tendencias para todo el periodo analizado.

Agosto

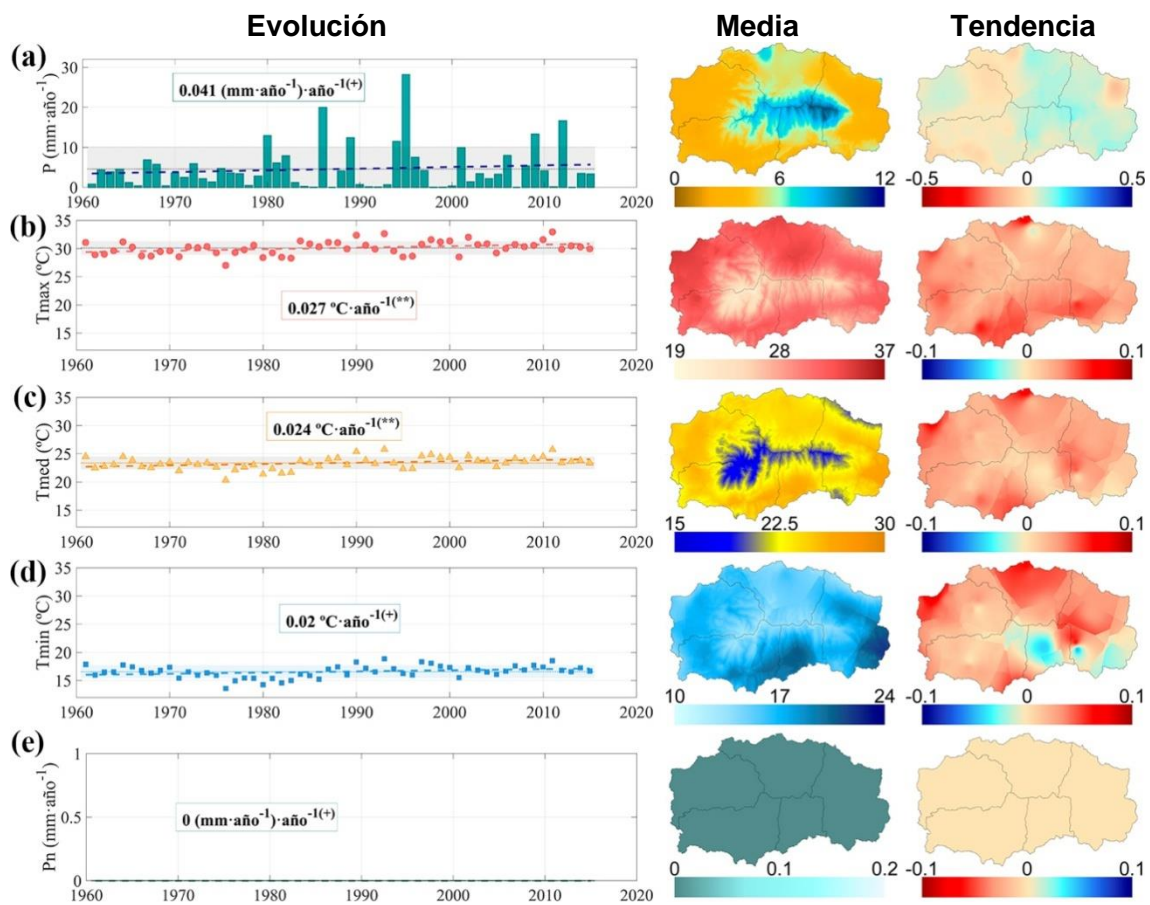


Figura C12. Evolución del mes de agosto de las variables (a) Precipitación acumulada mensual (b) Temperatura máxima media mensual; (c) Temperatura media mensual; (d) Temperatura mínima media mensual; (e) Precipitación en forma de nieve mensual. Cada variable se le asocia un mapa de valores medios y uno de tendencias para todo el periodo analizado.

BIBLIOGRAFÍA

- Agnew, M. and Palutikof, J. GIS-based construction of baseline climatologies for the Mediterranean using terrain variables. *Clim. Res.* 2000, 14, 115–127, doi:10.3354/cr014115.
- Aguilar, C., Herrero, J. and Polo, M.J. Topographic effects on solar radiation distribution in mountainous watersheds and their influence on reference evapotranspiration estimates at watershed scale. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2010, 14, 2479–2494, doi:10.5194/hess-14-2479-2010.
- Aguilar, C., Herrero, J., Millares, A., Losada, M.A. and Polo, M.J. *Meteomap: Generation Of Meteorological Variables For Distributed Physically-Based Hydrological Modeling*. CUNY Academic Works. 2014
- Ahmed, K., Shahid, S., Chung, E.S., Ismail, T. and Wang, X.J. Spatial distribution of secular trends in annual and seasonal precipitation over Pakistan. *Clim. Res.* 2017, 74, 95–107, doi:10.3354/cr01489
- Anderson, R.S., Jiménez-Moreno, G., Carrión, J.S. and Pérez-Martínez, C. Postglacial history of alpine vegetation, fire and climate from Laguna de Río Seco, Sierra Nevada, southern Spain. *Quaternary Sci. Rev.* 2011, 30, 1615–1629, doi:10.1016/j.quascirev.2011.03.005.
- Anderton, S. P., White, S. M., and Alvera, B: Evaluation of spatial variability in snow water equivalent for a high mountain catchment, *Hydrol. Process.*, 2004, 18, 435–453. doi.org/10.1002/hyp.1319
- Bales, R., Molotch, N.P., Painter, T.H., Dettinger, M.D., Rice, R. and Dozier, J. Mountain hydrology of the western United States, *Water Resour. Res.*, 2006, 42, W08432, doi:10.1029/2005WR004387.
- Barnett, T.P., Adam, J.C. and Lettenmainer, D.P. Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions. *Nature* 2005, 438, 304–309, doi:10.1038/nature04141.
- Benhamrouche, A. and Martin-Vide, J. Avances metodológicos en el análisis de la concentración diaria de la precipitación en la España peninsular. *Anal. de Geogr.* 2012, 32, 11–27, doi:10.5209/rev_aguc.2012.v32.n1.3930.
- Benhamrouche, A. and Martin-Vide, J. Distribución Espacial de la Concentración Diaria de la Precipitación en la Provincia de Alicante. *InvesGeogr.* 2011, 56, 113–129, doi:10.14198/INGEO2011.56.06.
- Beniston, M. Climatic Change in Mountain Regions: A Review of Possible Impacts. *Clim. Change* 2003, 59, 5–31, doi:10.1023/A:1024458411589.
- Beniston, M. Is snow in the Alps receding or disappearing?. *WIR: Climate Change*, 2012, 3(4), doi.org/10.1002/wcc.179
- Berg, N. and Hall, A. Increased Interannual Precipitation Extremes over California under Climate Change. *J. of Climate*. 2015, 28, 6324–6334, doi:10.1175/JCLI-D-14-00624.1.
- Berghuijs, W.R., Woods, R.A. and Hrachowitz, M. A precipitation shift from snow towards rain leads to a decrease in streamflow. *Nat. Clim. Chang.* 2014, 4, 583–586, doi:10.1038/nclimate2246.
- Blanca, G., Cueto, M., Martínez-Lirola, M.J. and Molero-Mesa, J. Threatened vascular flora of Sierra Nevada (Southern Spain). *Biol. Conserv.* 1998, 85, 269–285, doi:10.1016/S0006-3207(97)00169-9.
- Block, K. and Mauritsen, T. Forcing and feedback in the MPI-ESM-LR coupled model under abruptly quadrupled CO₂. *J. Adv. Model. Earth Syst.* 2013, 5, 676–691, doi:10.1002/jame.20041.

- Blöschl, G. Scaling issues in snow hydrology. *Hydrol. Process.* 1999, 13, 2149–2175, doi:10.1002/(SICI)1099-1085(199910)13:14/15<2149::AID-HYP847>3.0.CO;2-8.
- Boé, J. and Terray, L. Can metric-based approaches really improve multi-model climate projections? The case of summer temperature change in France. *Clim. Dyn.* 2015, 45, 1913–1928, doi:10.1007/s00382-014-2445-5.
- Brown, R. D., Mote, P. W. The response of northern hemisphere snow cover to a changing climate. *Climate J.* 2009, 22, 2124–2145 doi: 10.1175/2008JCLI2665.1
- Brunet, M. et al. Generación de escenarios regionalizados de cambio climático para España. Ministerio de Medio Ambiente Medio Rural y Marino. 2008. ISBN: 978-84-8320-470-2.
- Buytaert, W., Celleri, R., Willems, P., Bièvre, De, B. and Wyseure, G. Spatial and temporal rainfall variability in mountainous areas: A case study from the south Ecuadorian Andes. *J. Hydrol.* 2006, 329, 413–421, doi:10.1016/J.JHYDROL.2006.02.031.
- Cayan, D et al. 2013: https://www.swcarr.arizona.edu/sites/default/files/ACCSWUS_Ch6_Factsheet.pdf
- Cayan, D. R., Luers, A.L., Franco, G., Hanemann, M., Croes, B. and Vine, E. Overview of the California climate change scenarios project, *Clim. Change*, 2007, 72, S1 – S6.
- Cayan, D.; Tyree, M.; Kunkel, K. E. ; Castro, C.; Gershunov, A.; Barsugli, J. ; Ray, A. J.; Overpeck, J.; Anderson, M.; Russell, J.; Rajagopalan, B.; Rangwala, I. ; Duffy, P.. 2013. Future Climate: Projected Average. In *Assessment of Climate Change in the Southwest United States: A Report Prepared for the National Climate Assessment*, edited by G. Garfin, A. Jardine, R. Merideth, M. Black, and S. LeRoy, 2013, 101–125. A report by the Southwest Climate Alliance. Washington, DC: Island Press.
- Chaouche, K., Neppel, L., Dieulin, C., Pujol, N., Ladouche, B., Martin, E., Salas, D., Caballero Y. Analyses of precipitation, temperature and evapotranspiration in a French Mediterranean region in the context of climate change, *C. R. Geosci.*, **2010**, 342, 234–243, ISSN 1631-0713, doi.org/10.1016/j.crte.2010.02.001.
- Chou, C. and Lan, C.W., Changes in the Annual Range of Precipitation under Global Warming. *J. Clim.* 2012, 25, 222–235, doi:10.1175/JCLI-D-11-00097.1.
- Chou, C., Lan, C.W., Chou, C. and Lan, C.W. Changes in the Annual Range of Precipitation under Global Warming. *J. Clim.* 2012, 25, 222–235, doi:10.1175/JCLI-D-11-00097.1.
- Cortesi, N., González-Hidalgo, J.C., Brunetti, M., and Martin-Vide, J. Daily precipitation concentration across Europe 1971–2010. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2012, 12, 2799–2810, doi:10.5194/nhess-12-2799-2012.
- Coscarelli, R. and Caloiero, T. Analysis of daily and monthly rainfall concentration in Southern Italy (Calabria region). *J. Hydrol.* 2012, 416–417, 145–156, doi:10.1016/j.jhydrol.2011.11.047.
- Cramen, W. *et al.*, Climate change and interconnected risks to sustainable development in the Mediterranean. *Nat. Clim. Chang.* 2018, 8, 972–980, doi:10.1038/s41558-018-0299-2.
- Creutin, J.D. and Obled, C. Objective analyses and mapping techniques for rainfall fields: An objective comparison. *Water Resour. Res.* 1982, 18, 413–431, doi:10.1029/WR018i002p00413.
- Cudennec, C., Leduc, C. and Koutsoyiannis D. Dryland hydrology in Mediterranean regions—a review, *Hydrol. Sci. J.-J. Sci. Hydrol.* 2007, 52(6), 1077–1087, doi: 10.1623/hysj.52.6.1077

- Dai, A. Temperature and Pressure Dependence of the Rain-Snow Phase Transition over Land and Ocean. *Geophys. Res. Abstr.* 2008, 35, L12802, doi:10.1029/2008GL033295.
- Danco, J.F., DeAngelis, A.M., Raney, B.K. and Broccoli, A.J. Effects of a Warming Climate on Daily Snowfall Events in the Northern Hemisphere. *J. Clim.* 2016, 29, 6295–6318, doi:10.1175/JCLI-D-15-0687.1.
- Demaria, E.M.C., Maurer, E.P., Thrasher, B., Vicuña, S. and Meza, F.J. Climate changes impacts on an alpine watershed in Chile: Do new model projections change the story? *J. Hydrol.* 2013, 502, 128–138, doi:10.1016/j.jhydrol.2013.08.027.
- Diffenbaugh, N.S., Scherer, M. and Ashfaq, M. Response of snow-dependent hydrologic extremes to continued global warming. *Nat. Clim. Chang.* 2013, 3, 379–384, doi:10.1038/nclimate1732.
- Dimri, A.P., Kumar, D., Choudhary, A. and Maharana, P. Future changes over the Himalayas: Maximum and minimum temperature. *Glob. Planet. Change.* 2018, 162, 212–234, doi:10.1016/J.GLOPLACHA.2018.01.015.
- El Kenawy, A., López-Moreno, J.I. Vicente-Serrano, S. M. Recent changes in daily temperature extremes in Northeastern Spain: 1960–2006. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* **2011**, 11 (9), 2583–2603. DOI:10.5194/nhess-11-2583-2011.
- Elder, K., Dozier, J. and Michaelsen, J. Snow accumulation and distribution in an Alpine Watershed. *Wat. Res. Res.* 1991, 27 (7), 1541–1552, doi: 10.1029/91WR00506
- Esteban-Parra, M.J., Rodrigo, F.S. and Castro-Diez, Y. Spatial and temporal patterns of precipitation in Spain for the period 1880–1992. *Int. J. Climatol.* 1998, 18, 1557–1574, doi:10.1002/(SICI)1097-0088(19981130)18:14<1557::AID-JOC328>3.0.CO;2-J.
- Favier, V., Falvey, M., Rabatel, A., Praderio, E. and López, D. Interpreting discrepancies between discharge and precipitation in high-altitude area of Chile's Norte Chico region (26–32°S). *Water Resour. Res.* 2009, 45(2), W02424, doi:10.1029/2008WR006802.
- Fayad, A., Gascoin, S., Faour, G., López-Moreno, J.I., Drapeau, L., Le Page, M. and Escadafal, R. Snow hydrology in Mediterranean mountain regions: A review. *J. of Hydrol.* 2017, 551, 374–396, doi:10.1016/j.jhydrol.2017.05.063.
- Folton, N., Martin, E., Arnaud, P., L'Hermite, P., Tolsa, M. A 50-year analysis of hydrological trends and processes in a Mediterranean catchment, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, **2019**, 23, 2699–2714, doi.org/10.5194/hess-23-2699-2019
- Gampe, D., Nikulin, G. and Ludwig, R. Using an ensemble of regional climate models to assess climate change impacts on water scarcity in European river basins. *Sci. Total Environ.* 2016, 573, 1503–1518, doi:10.1016/J.SCITOTENV.2016.08.053.
- Garen, D.C. and Marks, D. Spatially distributed energy balance snowmelt modelling in a mountainous river basin: estimation of meteorological inputs and verification of model results. *J. Hydrol.* 2005, 315, 126–153, doi:10.1016/J.JHYDROL.2005.03.026.
- GFDL Global Atmospheric Model Development Team. The new GFDL global atmosphere and land model AM2/LM2: Evaluation with prescribed SST simulations. *J. Climate.* 2004, 17, 4641–4673, doi:10.1175/JCLI-3223.1.
- Gibbons, J.D. and Chakraborti, S. Nonparametric statistical inference, Chapman & Hall/Taylor & Francis, 2011, ISBN 9781420077612.

- Giorgetta, M. et al. Climate change from 1850 to 2100 in MPI-ESM simulations for the coupled model intercomparison project phase 5. *J. Adv. Model Earth Syst.* 2013, 5(3), 572-597, doi:10.1002/jame.20038.
- Giorgi, F. Climate change hot-spots. *Geophys. Res. Lett.* 2006, 33, L08707, doi:10.1029/2006GL025734.
- Giorgi, F., Mearns, L.O., Giorgi, F. and Mearns, L.O. Calculation of Average, Uncertainty Range, and Reliability of Regional Climate Changes from AOGCM Simulations via the “Reliability Ensemble Averaging” (REA) Method. *J. Clim.* 2002, 15, 1141–1158, doi:10.1175/1520-0442(2002)015<1141:COAURA>2.0.CO;2.
- Gómez-Giraldez, P., Aguilar, C. and Polo, M.J. NDVI sensitivity to the hydrological regime in semiarid mountainous environments. *Proceedings, Remote sensing for agriculture, ecosystems and hydrology XVI.* 2012. 8531, 85311A. doi:10.1117/12.974534.
- Griffies, S.M. et al. Formulation of an ocean model for global climate simulations. *Ocean. Sci.* 2005, 1, 45-79, doi:10.5194/os-1-45-2005.
- Groisman, P.Y., Knight, R.W., Easterling, D.R., Karl, T.R., Hegerl, G.C., and Razuvaev, V.N. Trends in Intense Precipitation in the Climate Record. *J. Clim.* 2005, 18, 1326–1350, doi:10.1175/JCLI3339.1.
- Grundstein, A. J., and Leathers, D. J. A spatial analysis of snow-surface energy exchanges over the northern Great Plains of the United States in relation to synoptic scale forcing mechanisms. *Int. J. Climatol.* 1999, 19, 489–511, doi: 10.1002/(SICI)1097-0088(199904)19:5%3C489::AID-JOC373%3E3.0.CO;2-J
- Hamlet, A.F., Mote, P.W., Clark, M.P. and Lettenmaier, D.P. Effects of Temperature and Precipitation Variability on Snowpack Trends in the Western United States. *J. Clim.* 2005, 18, 4545-4561. doi:10.1175/JCLI3538.1.
- Harpold, A. A., Brooks, P. D. Humidity determines snowpack ablation under a warming climate. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 2018, 115, 1215– 1220. doi:10.1073/pnas.1716789115
- Hatchett, B., Daudert, B., Garner, C., Oakley, N., Putnam, A. and White, A. Winter Snow Level Rise in the Northern Sierra Nevada from 2008 to 2017. *Water.* 2017, 9, 899, doi:10.3390/w9110899.
- Herrero J., Polo M.J. and M.A. Losada. Snow evolution in Sierra Nevada (Spain) from an energy balance model validated with Landsat TM data. *Proceedings, Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XIV*, 2011,Pragha, Czech Republic, SPIE 8531.
- Herrero, J. and Polo, M. J. Evapsublimation from the snow in the Mediterranean mountains of Sierra Nevada (Spain), *Cryosph.* 2016, 10(6), 2981–2998, doi:10.5194/tc-10-2981-2016.
- Herrero, J., Aguilar, C., Polo, M.J. and M.A., Losada: Mapping of meteorological variables for runoff generation forecast in distributed hydrological modeling. *Proceeding, Hydraulic Measurements & Experimental Methods Conference*, New York, 606–611.
- Herrero, J., Millares, A., Aguilar, C., Egüen, M., Losada, M.A. and Polo, M.J. Coupling Spatial And Time Scales In The Hydrological Modelling Of Mediterranean Regions: WiMMed. *CUNY Academic Works.* 2014
- Herrero, J., Polo, M. J., Moñino, A. and Losada, M. A. An energy balance snowmelt model in a Mediterranean site, *J. Hydrol.* 2009, 371(1), 98–107, doi:10.1016/j.jhydrol.2009.03.021.

- Herrero, J., Polo, M.J., Moñino, A. and Losada, M.A. An energy balance snowmelt model in a Mediterranean site. *J. Hydrol.* 2009, 371, 98–107, doi:10.1016/J.JHYDROL.2009.03.021.
- Heywood, V. Endemism and biodiversity of the flora and vegetation of Sierra Nevada: Environmental consequences. In *Sierra Nevada. Conservación y Desarrollo Sostenible*; Madrid, Spain; pp. 191–201.
- Hood, E., Williams, M., & Cline, D. Sublimation from a seasonal snowpack at a continental, mid-latitude alpine site. *Hydrol. Processes.* 1999, 13, 1781–1797. doi: 10.1002/(SICI)1099-1085(199909)13:12/13<1781::AID-HYP860>3.0.CO;2-C
- Howat, I.M., Tulaczyk, S. Trends in spring snowpack over a half-century of climate warming in California, USA. *Ann. Glaciol.*, 2005, 40, 151–156, doi: 10.3189/172756405781813816
- Huss, M. et al. Toward mountains without permanent snow and ice. *Earth's Future* 2017, 5, 418–435, doi:10.1002/2016EF000514.
- IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
- IPCC. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. 2014, IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
- Jiménez Cisneros, B.E., Oki, T., Arnell, N.W., Benito, G., Cogley, J.G., Döll, P., Jiang, T., Mwakilila, S.S. Intergovernmental Panel on Climate Change, “Freshwater Resources,” in *Climate Change 2014 – Impacts, Adaptation and Vulnerability: Part A: Global and Sectoral Aspects: Working Group II Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report*, Cambridge: Cambridge University Press, 2014, 1, 229–270, doi: 10.1017/CBO9781107415379
- Jones, C. et al. Twenty-First-Century Compatible CO₂ Emissions and Airborne Fraction Simulated by CMIP5 Earth System Models under Four Representative Concentration Pathways. *J. Clim.* 2013, 26, 4398–4413, doi:10.1175/JCLI-D-12-00554.1.
- Jungclauss, J.H. et al. Characteristics of the ocean simulations in the Max Planck Institute Ocean Model (MPIOM) the ocean component of the MPI-Earth system model. *J. Adv. Model. Earth Syst.* 2013, 5, 422–446, doi:10.1002/jame.20023.
- Kalnay, E. et al. The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 1996, 77, 437–471, doi:10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2.
- Kalnay, M. et al. The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 1996, 7, 437–471, doi:10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2.
- Kaminski, T. et al. The BETHY/JSBACH Carbon Cycle Data Assimilation System: experiences and challenges. *J. Geophys. Res. Biogeosciences.* 2013, 118, 1414–1426, doi:10.1002/jgrg.20118.
- Kaniewski, D., DeLaet, V., Paulissen, E., Waelkens, M. Long-term effects of human impact on mountainous ecosystems, western Taurus Mountains, Turkey, *Journal of Biogeography*, 2007, 34(11), doi.org/10.1111/j.1365-2699.2007.01753.x
- Kattelmann, R., Elder, K. Hydrologic characteristics and water-balance of an alpine basin in the Sierra-Nevada. *Water Resour. Res.* 1991, 27, 1553–1562, doi: 10.1029/90WR02771

- Kay, A.L. A review of snow in Britain: The historical picture and future projections. *Prog. Phys. Geogr.* 2016, 40 (5), 676-698, doi:10.1177/0309133316650617.
- Kilsby C.G. Predicting rainfall statistics in England and Wales using atmospheric circulation variables. *Int. J. Climatol.* 1998, 18, 523-539, doi:10.1002/(SICI)1097-0088(199804)18:5<523::AID-JOC268>3.3.CO;2-O.
- Klein Tank, A.M.G. et al. Daily dataset of 20th-century surface air temperature and precipitation series for the European Climate Assessment. *Int. J. Climatol.* 2002, 22, 1441-1453, doi:10.1002/joc.773.
- Klos, P.Z., Link, T.E. and Abatzoglou, J.T. Extent of the rain-snow transition zone in the western U.S. under historic and projected climate. *Geophys. Res. Lett.* 2014, 41, 4560-4568, doi:10.1002/2014GL060500.
- Knowles, N., Dettinger, M. D., Cayan, D. R. Trends in snowfall versus rainfall in the western United States, *J. Clim.*, **2006**, vol 19 (18), 4545-4559. DOI: 10.1175/JCLI3850.1.
- Knutti, R. et al. Challenges in Combining Projections from Multiple Climate Models. *J. Clim.* 2010, 23, 2739-2758, doi:10.1175/2009JCLI3361.1.
- Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B. and Rubel, F. World Map of the KöppenGeiger climate classification updated. *Meteorol. Z.*, 2006, 15 (3), 259-263, doi:10.1127/0941-2948/2006/0130.
- Kunkel, K.E., Palecki, M., Ensor, L., Hubbard, K.G. , Robinson, D., Redmond, K., Easterling, D. Trends in twentieth-century U.S. snowfall using a quality-controlled dataset. *J. Atmos. Ocean. Tech.* **2009**, 26 (1), 33-44. DOI: 10.1175/2008JTECHA1138.1.
- Kustas, W. P., Rango, A., and R. Uijlenhoet. A simple energy budget algorithm for the snowmelt runoff model. *Water Resour. Res.*, 1994, 30, 1515-1527. doi: 10.1029/94WR00152
- Lang, R. Verwitterung und BodenbildungsEinführung in die Bodenkunde 1920.
- Legutke, S. and Voss, R. The Hamburg Atmosphere-Ocean Coupled Circulation Model ECHO-G. World Data Center for Climate (WDCC) at DKRZ. 1999, doi:10.2312/WDCC/DKRZ_Report_No18.
- López-Moreno, J. I., Pomeroy, J., Revuelto, J., Vicente-Serrano, S. M. (2013). Response of snow processes to climate change: spatial variability in a small basin in the Spanish Pyrenees. *Hydrol. Process.* 27, 2637-2650. doi: 10.1002/hyp.9408
- López-Moreno, J.I. et al. Different sensitivities of snowpacks to warming in Mediterranean climate mountain areas. *Environ. Res. Lett.* 2017, 12, 074006, doi:10.1088/1748-9326/aa70cb.
- López-Moreno, J.I., Beniston, M. and García-Ruiz, J.M. Environmental change and water management in the Pyrenees: Facts and future perspectives for Mediterranean mountains. *Glob. Planet. Change* 2008 , 61 (3-4), 300-312, doi:10.1016/j.gloplacha.2007.10.004.
- Lopez-Moreno, J.I., Goyette, S. and Beniston, M. Impact of climate change on snowpack in the Pyrenees: Horizontal spatial variability and vertical gradients. *J. of Hydrol.* 2009, 374(3-4), 384-396, doi:10.1016/j.jhydrol.2009.06.049.
- Lorite, J., Navarro, F.B. and Valle, F. Estimation of threatened orophytic flora and priority of its conservation in the Baetic range (S. Spain). *Plant Biol.* 2007, 141, 1-14, doi:10.1080/11263500601153560.

- Luce, C. H. and Tarboton, D. G.: The application of depletion curves for parameterization of subgrid variability of snow, *Hydrol. Process.*, 2004, 18, 1409–1422, doi: 10.1002/hyp.1420.
- Lundquist, J.D., Neiman, P.J., Martner, B., White, A.B., Gottas, D.J. and Ralph, F.M. Rain versus Snow in the Sierra Nevada, California: Comparing Doppler Profiling Radar and Surface Observations of Melting Level. *J. Hydrometeorol.* 2008, 9, 194–211, doi:10.1175/2007JHM853.1.
- Lynch-Stieglitz, M. The Development and Validation of a Simple Snow Model for the GISS GCM. *J. Clim.* 1994, 7, 1842–1855, doi:10.1175/1520-0442(1994)007<1842:TDAVOA>2.0.CO;2.
- MacDonald, M. K., Pomeroy, J. W., & Pietroniro, A. On the importance of sublimation to an alpine snow mass balance in the Canadian Rocky Mountains. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2012, 14, 1401–1415. doi: 10.5194/hess-14-1401-2010
- Maheras, P., Balafoutis, C. and Vafiadis, M. Precipitation in the Central Mediterranean during the last century. *Theor. Appl. Climatol.* 1992, 45, 209–216, doi:10.1007/BF00866194.
- Maier-Reimer, E., Kriest, I., Segschneider, J. and Wetzol, P. The HAMburg Ocean Carbon Cycle Model HAMOCC5.1 - Technical Description Release 1.1. 2005, doi:10.17617/2.994983.
- Marchane, A. et al. Assessment of daily MODIS snow cover products to monitor snow cover dynamics over the Moroccan Atlas mountain range. *Remote Sens. Environ.* 2015, 160, 72–86, doi:10.1016/j.rse.2015.01.002.
- Marks, D. and Winstral, A. Comparison of Snow Deposition, the Snow Cover Energy Balance, and Snowmelt at Two Sites in a Semiarid Mountain Basin, *J. Hydrometeorol.* 2001, 2, 213–227. Doi: 10.1175/1525-7541(2001)002<0213:COSDTS>2.0.CO;2
- Marks, D., Dozier, J. Climate and energy exchange at the snow surface in the alpine region of the Sierra-Nevada. Snow cover energy-balance. *Water Resour. Res.* 1992, 28, 3043–3054, doi: 10.1029/92WR01483
- Marks, D., Winstral, A., Reba, M., Pomeroy, J. and Kumar, M. An evaluation of methods for determining during-storm precipitation phase and the rain/snow transition elevation at the surface in a mountain basin. *Adv. Water Resour.* 2013, 55, 98–110, doi:10.1016/J.ADVWATRES.2012.11.012.
- Martin-Vide, J. Spatial distribution of a daily precipitation concentration index in Peninsular Spain. *Int. J. Climatol.* 2004, 24, 959–971, doi:10.1002/joc.1030.
- Marty, C., Schlögl, S., Bavay, M. and Lehning, M. How much can we save? Impact of different emission scenarios on future snow cover in the Alps. *Cryosph.* 2017, 11, 517–529, doi:10.5194/tc-11-517-2017.
- Ménard, C.B.; Essery, R.; Pomeroy, J. Modelled sensitivity of the snow regime to topography, shrub fraction and shrub height. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2014, 18, 2375–2392. doi.org/10.5194/hess-18-2375-2014.
- Mernild, S. H., Liston, G. E., Hiemstra, C. A., Malmros, J. K., Yde, J. C. McPhee, J. The Andes Cordillera. Part I: snow distribution, properties, and trends (1979–2014). *Int. J. Climatol.* 2017, 37, 1680–1698. doi: 10.1002/joc.4804
- Meza, F.J., Wilks, D.S., Gurovich, L. and Bambach, N. Impacts of Climate Change on Irrigated Agriculture in the Maipo Basin, Chile: Reliability of Water Rights and Changes in the Demand for Irrigation. *J Water Res. PL.-Asce.* 2012, 138(5), 421–430, doi:10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000216.

- Mhawej, M., Faour, G., Fayad, A. and Shaban, A. Towards an enhanced method to map snow cover areas and derive snow-water equivalent in Lebanon. *J. of Hydrol.* 2014, 513, 274–282, doi:10.1016/j.jhydrol.2014.03.058.
- Molina-Navarro, E., Andersen, H.E., Nielsen, A., Thodsen, H. and Trolle, D. Quantifying the combined effects of land use and climate changes on stream flow and nutrient loads: A modelling approach in the Odense Fjord catchment (Denmark). *Sci. Total Environ.* 2018, 621, 253–264, doi:10.1016/J.SCITOTENV.2017.11.251.
- Möller, L.; Hanke, B.; Lubinski, L.; Kollig, C. For life, for the future. *Biosphere reserves and climate change.*
- Molotch, N. and Meromy, L. Physiographic and climatic controls on snow cover persistence in the Sierra Nevada Mountains. *Hydrol. Process.* 2014, 28, 4573–4586, doi:10.1002/hyp.10254.
- Monaghan, A.J., Bromwich, D.H. and Schneider, D.P. Twentieth century Antarctic air temperature and snowfall simulations by IPCC climate models. *Geophys. Res. Lett.* 2008, 35, n/a–n/a, doi:10.1029/2007GL032630.
- Mote, P. W. Climate-driven variability and trends in mountain snowpack in Western North America. *J. Clim.* 2006, 19, 6209–6220. doi: 10.1175/JCLI3971.1
- Mote, P.W. Trends in snow water equivalent in the Pacific Northwest and their climatic causes. *Geophys. Res. Lett.* 2003, 30, doi:10.1029/2003GL017258.
- Mote, P.W., Hamlet, A.F., Clark, MP. and Lettenmaier, D.P. Declining mountain snowpack in western North America. *Bull Am Met Soc* 2005, 86, 39–49, doi: 10.1175/BAMS-86-1-39
- Motoyama, H. Simulation of Seasonal Snow cover Based on Air Temperature and Precipitation. *J. Appl. Meteorol.* 1990, 29, 1104–1110, doi:10.1175/1520-0450(1990)029<1104:SOSSBO>2.0.CO;2.
- Mudryk, L.R. et al. Canadian snow and sea ice: historical trends and projections. *Cryosph.* 2018, 12, 1157–1176, doi:10.5194/tc-12-1157-2018.
- Musselman, K. N., Pomeroy, J. W., Essery, R. L., Leroux, N. Impact of windflow calculations on simulations of alpine snow accumulation, redistribution and ablation. *Hydrol. Process.* 2015, 29, 3983–3999, doi: 10.1002/hyp.10595
- Musselman, K.N, Clark, M., Liu, C., Ikeda, K. and Rasmussen, R. Slower snowmelt in a warmer world. *Nat. Clim. Change.* 2017, 7, 214–119, doi:10.1038/nclimate3225.
- Myers, N., Mittermeier, R.A., Mittermeier, C.G., da Fonseca, G.A.B. and Kent, J. Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature.* 2000, 403, 853–858, doi:10.1038/35002501.
- Narula S.C. y Wellington J.F. Algorithm for minimum sum of weighted absolute errors regression. *Commun. Stat. B-Simul. &Comput.* 1977, 6(4), 341–352, doi:10.1080/03610917708812049.
- Nashwan, M.S. and Shahid, S. Spatial distribution of unidirectional trends in climate and weather extremes in Nile river basin. *Theor. Appl. Climatol.* 2018, 137, 1181–1199. doi:10.1007/s00704-018-2664-5
- Nashwan, M.S., Shahid, S. and Rahim, N.A. Unidirectional trends in annual and seasonal climate and extremes in Egypt. *Theor. Appl. Climatol.* 2018, 136, 457–473, doi: 10.1007/s00704-018-2498-1
- New, M., Todd, M., Hulme, M. and Jones, P. Precipitation measurements and trends in the twentieth century. *Int. J. Climatol.* 2001, 21, 1889–1922, doi:10.1002/joc.680.

- Norrant, C. and Douguédroit, A. Monthly and daily precipitation trends in the Mediterranean (1950–2000). *Theor. Appl. Climatol.* 2006, 83, 89–106, doi:10.1007/s00704-005-0163-y.
- Pérez-Palazón, M.J., Pimentel, R., Herrero, J., Aguilar, C., Perales, J.M., and Polo, M.J. Extreme values of snow-related variables in Mediterranean regions: trends and long-term forecasting in Sierra Nevada (Spain). *Proc. IAHS.* 2015, 369, 157–162, doi:10.5194/piahs-369-157-2015.
- Pérez-Palazón, M.J., Pimentel, R., Herrero, J., Aguilar, C., Perales, J.M. and Polo, M.J. Extreme values of snow-related variables in Mediterranean regions: trends and long-term forecasting in Sierra Nevada (Spain). *Proc. Int. Assoc. Hydrol. Sci.* 2015, 369, 157–162, doi:10.5194/piahs-369-157-2015.
- Petisco, S.E., Martín J.M. Escenarios de temperatura y precipitación para la España peninsular y Baleares durante el período 2001–2100 basados en “*downsacaling*” estadístico mediante métodos de análogos. XXIX Jornadas Científicas de la Asociación Meteorológica Española. 2006, Pamplona, Navarra, España.
- Petisco, S.E., Martín, J.M. and Gel, D. Método de estima de precipitación mediante “*downsacaling*”. Nota técnica n.º 11 del Servicio de Variabilidad y Predicción del Clima. 2005, INM, Madrid.
- Petisco, S.E.; Martín, J.M. ;Escenarios de temperatura y precipitación para la España peninsular y Baleares durante el período 2001–2100 basados en “*downsacaling*” estadístico mediante métodos de análogos. In XXIX Jornadas Científicas de la Asociación Meteorológica Española; 2006.
- Philandras, C. M., Nastos, P. T., Kapsomenakis, J., Douvis, K. C., Tselioudis, G., Zerefos, C. S. Long term precipitation trends and variability within the Mediterranean region. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* **2011**, 11 (12), 3235–3250, DOI: 10.5194/nhess-11-3235-2011.
- Pimentel, R., Herrero, J. and Polo, M. J. Quantifying Snow Cover Distribution in Semiarid Regions Combining Satellite and Terrestrial Imagery. *Remote Sens.* 2017a, 9(10), 995, doi:10.3390/rs9100995.
- Pimentel, R., Herrero, J. and Polo, M. J. Subgrid parameterization of snow distribution at a Mediterranean site using terrestrial photography, *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2017c, 21(2), 805–820, doi:10.5194/hess-21-805-2017.
- Pimentel, R., Herrero, J., Zeng, Y., Su, Z. and Polo, M. J. Study of Snow Dynamics at Subgrid Scale in Semiarid Environments Combining Terrestrial Photography and Data Assimilation Techniques, *J. Hydrometeor.* 2015, 16(2), 563–578 doi:10.1175/JHM-D-14-0046.1.
- Polade, S.D., Gershunov, A., Cayan, D.R., Dettinger, M.D. and Pierce, D.W. Precipitation in a warming world: Assessing projected hydro-climate changes in California and other Mediterranean climate regions. *Sci. Rep.* 2017, 7 (1), 10783, doi:10.1038/s41598-017-11285-y.
- Polo, M. J., Herrero, J., Pimentel, R., and Pérez-Palazón, M. J. The Guadalfeo Monitoring Network (Sierra Nevada, Spain): 14 years of measurements to understand the complexity of snow dynamics in semiarid regions, *Earth Syst. Sci. Data*, 2019, 11, 393–407, doi:10.5194/essd-11-393-2019.
- Polo, M.J., Herrero, J., Aguilar, C., Millares, A., Moñino, A., Nieto, S. and Losada, M.A. WiMMed, a distributed physically-based watershed model I: Description and validation. *Environmental Hydraulics. Theoretical, experimental and computational solutions.* 2010, Taylor and Francis, 360 pp.

- Rajagopal, S. and Harpold, A.A. Testing and Improving Temperature Thresholds for Snow and Rain Prediction in the Western United States. *JAWRA J. Am. Water Resour. Assoc.* 2016, 52, 1142–1154, doi:10.1111/1752-1688.12443.
- Rauscher, S. A., Pal, J.S., Diffenbaugh, N.S. and M. M. Benedetti, Future changes in snowmelt-driven runoff timing over the western US, *Geophys. Res. Lett.*, 2008, 35, doi:10.1029/2008GL034424.
- Reba, M. L., Pomeroy, J., Marks, D., Link, T. E. Estimating surface sublimation losses from snowpacks in a mountain catchment using eddy covariance and turbulent transfer calculations. *Hydrol. Processes.* 2012, 26, 3699–3711. doi: 10.1002/hyp.8372
- Rebecca, M. Vionnet, V., Grünwald, T. The Seasonal Snow Cover Dynamics: Review on Wind-Driven Coupling Processes. *Front. Earth Sci.* 2018, 6, doi: 10.3389/feart.2018.00197.
- Romero, R., Guijarro, J.A., Ramis, C. and Alonso, S. A 30-year (1964–1993) daily rainfall data base for the Spanish Mediterranean regions: first exploratory study. *Int. J. Climatol.* 1998, 18, 541–560, doi:10.1002/(SICI)1097-0088(199804)18:5<541::AID-JOC270>3.0.CO;2-N.
- Romero, R., Ramis, C., Guijarro, J.A and Sumner, G. Daily rainfall affinity areas in mediterranean Spain. *Int. J. Climatol.* 1999, 19, 557–578, doi:10.1002/(SICI)1097-0088(199904)19:5<557::AID-JOC377>3.0.CO;2-D.
- Russell, G.L., Miller, J.R. and Rind, D. A coupled atmosphere-ocean model for transient climate change studies. *Atmos. Ocean.* 1995, 33, 683–730, doi:10.1080/07055900.1995.9649550.
- Schmidt, G.A. et al. Present day atmospheric simulations using GISS ModelE: Comparison to in-situ, satellite and reanalysis data. *J. Climate.* 2006, 19, 153–192, doi:10.1175/JCLI3612.1.
- Sen, Z. Innovative trend significance test and applications. *Theor. Appl. Climatol.* 2015, 127, 939–947, doi: 10.1007/s00704-015-1681-x
- Senatore, A., Mendicino, G., Smiatek, G. and Kunstmann, H. Regional climate change projections and hydrological impact analysis for a Mediterranean basin in Southern Italy. *J. Hydrol.* 2011, 399, 70–92, doi:10.1016/j.jhydrol.2010.12.035.
- Shuttleworth, W.J. The challenges of developing a changing world. *Eos, Trans. Am. Geophys. Union.* 1996, 77, 347, doi:10.1029/96EO00239.
- Solomon, S., Quin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K., Tignort, M. and Miller, H. *Climate Change: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change; United Kingdom and New York, USA, 2017;*
- Sonali, P. and Nagesh Kumar, D. Review of trend detection methods and their application to detect temperature changes in India. *J. Hydrol.* 2013, 476, 212–227, doi:10.1016/j.jhydrol.2012.10.034
- Stevens, B. et al. Atmospheric component of the MPI-M Earth System Model: ECHAM6. *J. Adv. Model. Earth Syst.* 2013, 5, 146–172, doi:10.1002/jame.20015.
- Stewart, I.T., Cayan, D.R and Dettinger, M.D. Changes toward earlier streamflow timing across western North America. *J Clim* 2005, 18, 1136–1155, doi: 10.1175/JCLI3321.1
- Sturm, M. and Holmgren, J.: Effects of microtopography on texture, temperature and heat flow in Arctic and sub-Arctic snow, *Ann. Glaciol.*, 1994, 19, 63–68. doi.org/10.1016/j.rse.2018.05.028

- Sun, F., Hall, A., Schwartz, M., Walton, D.B. and Berg, N. Twenty-First-Century Snowfall and Snowpack Changes over the Southern California Mountains. *J. Clim.* 2016, 29, 91-110, doi:10.1175/JCLI-D-15-0199.1.
- Susong, D., Marks, D. and Garen, D. Methods for developing time-series climate surfaces to drive topographically distributed energy- and water-balance models. *Hydrol. Process.* 1999, 13, 2003–2021, doi:10.1002/(SICI)1099-1085(199909)13:12/13<2003::AID-HYP884>3.0.CO;2-K.
- Takala, O. M., Pulliainen, J., Metsämäki, S., Koskinen, J. Detection of snowmelt using spaceborne microwave radiometer data in Eurasia from 1979 to 2007. *IEEE Trans. Geosci. Electron.* 2009, 47, 2996–3007, doi: 10.1109/TGRS.2009.2018442
- Tan, M.L., Ibrahim, A.L., Yusop, Z., Chua, V.P. and Chan, N.W. Climate change impacts under CMIP5 RCP scenarios on water resources of the Kelantan River Basin, Malaysia. *Atmos. Res.* 2017, 189, 1–10, doi:10.1016/J.ATMOSRES.2017.01.008.
- Tebaldi, C. et al. Quantifying Uncertainty in Projections of Regional Climate Change: A Bayesian Approach to the Analysis of Multimodel Ensembles. *J. Clim.* 2005, 18, 1524–1540, doi:10.1175/JCLI3363.1.
- Tokiota, T., Yamazaki, K., Yagai, I. and Kitoh, A. A description of the MRI atmospheric general circulation model (The MRI – GCM-I). Technical Reports of the Meteorological Research Institute. 1984, 13, 249, doi:10.11483/mritechrepo.13.
- Trenberth, K.E. Changes in precipitation with climate change. *Clim. Res.* 2011, 47, 123–138, doi:10.3354/cr00953.
- Ulbrich, U., Lionello, P., Belusic, D., Jacobeit, J., Knippertz, P., Kuglitsch, F.G., Leckebusch, G.C., Luterbacher, J., Maugeri, M., Maheras, P., Nissen, K.M., Pavan, V., Pinto, J.G., Saaroni, H., Seubert, S., Toreti, A., Xoplaki, E., Ziv, B. Climate of the mediterranean: Synoptic patterns, temperature, precipitation, winds, and their extremes (Chapter 5). *Elsevier Inc.* 2012. ISBN: 9780124160422 DOI: 10.1016/B978-0-12-416042-2.00005-7.
- Valdés-Pineda, R. et al. Water governance in Chile: Availability, management and climate change. *J. Hydrol.* 2014, 519, 2538–2567, doi:10.1016/j.jhydrol.2014.04.016.
- Valdés-Pineda, R. et al. Water governance in Chile: Availability, management and climate change. *J. Hydrol.* 2014, 519, 2538-2567, doi:10.1016/j.jhydrol.2014.04.016.
- Valt., M, Cianfarra, P. Recent snow cover variability in the Italian Alps. *Cold Regions Science and Technology*, 2010, 64(2), 146-157, doi.org/10.1016/j.coldregions.2010.08.008
- Verfaillie, D., Lafaysse, M., Déqué, M., Eckert, N., Lejeune, Y. and Morin, S. Multi-component ensembles of future meteorological and natural snow conditions for 1500 m altitude in the Chartreuse mountain range, Northern French Alps. *Cryosph.* 2018, 12, 1249–1271, doi:10.5194/tc-12-1249-2018.
- Vicuña, S., Garreaud, R.D. and McPhee, J. Climate change impacts on the hydrology of a snowmelt driven basin in semiarid Chile. *Clim. Change.* 2011, 105, 469–488, doi:10.1007/s10584-010-9888-4.
- Volodin, E.M., Dianskii, N.A. and Gusev, A.V. Simulating Present Day Climate with the INMCM4.0 Coupled Model of the Atmospheric and Oceanic General Circulations. *Izv. Atmos. Ocean. Phys.* 2010, 46m 4, 414-431, doi:10.1134/S000143381004002X.

- von Salzen, K. et al. The Canadian Fourth Generation Atmospheric Global Climate Model (CanAM4). Part I: Representation of Physical Processes. Atmos. Ocean. 2013, 51(1), 104-125, doi:10.1080/07055900.2012.755610.
- Watanabe, M., and Nitta, T. Relative impacts of snow and sea surface temperature anomalies on an extreme phase in the winter atmospheric circulation. J Clim1998, 11, 2837–2857, doi: 10.1175/1520-0442(1998)011<2837:RIOSAS>2.0.CO;2
- Wi, S., Dominguez, F., Durcik, M., Valdes, J., Diaz, H. F., Castro, C. L. Climate change projection of snowfall in the Colorado River Basin using dynamical *downsacaling*. Water Resour.Res. **2012**, 48 (5), DOI: 10.1029/2011WR010674.
- Wilby R.L., Dawson C.W. and Barrow E.M. SDSM - a decision support tool for the assessment of regional climate change impacts. Environ. Model. Softw. 2002, 17, 145-157, doi:10.1016/S1364-8152(01)00060-3.
- Yang, Z.L. et al. Validation of the Snow Submodel of the Biosphere–Atmosphere Transfer Scheme with Russian Snow Cover and Meteorological Observational Data. J. Clim. 1997, 10, 353–373, doi:10.1175/1520-0442(1997)010<0353:VOTSSO>2.0.CO;2.
- Yukimoto, S. et al. The New Meteorological Research Institute Coupled GCM (MRI-CGCM2). Model Climate and Variability. Pap. Meteorol. Geophys. 2001, 51(2), 47-88, doi:10.2467/mripapers.51.47.
- Zebre, Glaciokarst landforms and processes of the southern Dinaric Alps. Earth Surface Processes and Landforms, 2015, 40,11, doi.org/10.1002/esp.3731
- Zorita, E. and von Storch, H. The Analog Method as a Simple Statistical *Downsacaling* Technique: Comparison with More Complicated Methods. J. Clim. 1999, 12, 2474–2489, doi:10.1175/1520-0442(1999)012<2474:TAMAAS>2.0.CO;2.